

TARTU ÜLIKOOL
Füüsika Instituut
Füüsikalise optika labor

FÜÜSIKA ERIALA - BAKALAUREUSETÖÖ (6 EAP)

Arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodi võrdlus

Autor:

Anette KUUSEORG

Juhendajad:

Jan BOGDANOV, MSc

Sandhra-Mirella VALDMA, MSc

Arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodi võrdlus

Arvutuslik kummituskuva ja üksikpikslikaamera on kaks üksikpiksli kuva alameetodit, kus objektist saadakse kujutis struktureeritud valgustamise ja ühepikslise detektori abil. Arvutusliku kummituskuva meetodi puhul valgustatakse objekti struktureeritud valgusväljaga ehk valgusmustritega. Üksikpikslikaamera meetodi puhul moduleeritakse objektilt peegeldunud valgust mustritega. Bakalaureusetöös võrreldakse, kuidas eksperimentaalse te parameetrite varieerimine mõjutab nende meetodite abil mõõdetud objektide kahe mõõtmelisi kujutisi. Kuna kujutise rekonstrueerimine toimub kahe kuvamismeetodi puhul matemaatiliselt identselt, siis oli esimeseks hüpoteesiks, et kahe kuvamismeetodi mõõtmistulemused on samuti sarnased. Tegelikuses erinesid mõõtmistulemused märgatavalt ja kvaliteetsemaid tulemusi andis üksikpikslikaamera meetod. Samas leidis kinnitust teine hüpotees, et välisvalguse kasutamine mõõtmistel parandab üksikpikslikaamera mõõtmistulemusi, kuid muudab arvutuslikku kummituskuva tulemused mürasemaks.

Märksõnad: arvutuslik kummituskuva, üksikpiksli kuva, üksikpikslikaamera

CERCS: P200 — Elektromagnetism, optika, akustika

Comparison of computational ghost imaging and single-pixel camera

Computational ghost imaging and single-pixel camera are two different single-pixel imaging techniques, where objects are reconstructed with the help of structured light patterns and a single-pixel detector. In computational ghost imaging, objects are illuminated with structured light patterns, whilst in single-pixel camera, patterns are constructed from light reflected from the object. The aim of this thesis was to compare how experimental parameters affect the reconstructed images for both computational ghost imaging and single-pixel camera. The used methods are mathematically identical, so imaging results were expected to be equivalent too. Findings revealed the reconstructed images to differ significantly, with the single-pixel camera method giving better results compared to the computational ghost imaging method. Additionally, the hypothesis that the single-pixel camera results' contrast would increase and the computational ghost imaging decrease with added lighting found support based on measurement results.

Keywords: computational ghost imaging, single-pixel imaging, single-pixel camera

CERCS: P200 — Electromagnetism, optics, acoustics

Sisukord

Sissejuhatus	1
1 Teoreetilised alused	3
1.1 Üksikpiksli kuva	3
1.1.1 Arvutuslik kummituskuva	6
1.1.2 Üksikpikslikaamera	6
1.2 Mustrite tekitamine	7
1.3 Hadamard'i maatriksid	8
1.4 Kujutise rekonstrueerimine	10
1.5 Müra eksperimentides	12
2 Meetodid	14
2.1 Eksperimendi vahendid	14
2.2 Arvutusliku kummituskuva eksperiment	18
2.3 Üksikpikslikaamera meetodi eksperiment	20
3 Tulemused ja analüüs	22
3.1 Valge lehega mõõtmised	22
3.2 Kahemõõtmelise objektiga mõõtmised	25
3.3 Kolmemõõtmelise objektiga mõõtmised	27
Kirjandus	34
Lihtlitsents	38

Sissejuhatus

Konkreetselt objekti või stseeni visuaalne taasesitamine ehk kujutamine on olnud ja on siia maani oluline osa näiteks teaduses, meditsiinis kui ka inimeste igapäevaelus. Teaduses varieeruvad jäädvustatavate objektide mõõtmed palju. Mikroskoobiga tehakse ülevõtteid näiteks aatomitevahelistest sidemetest [1] ning teleskoobiga pilte miljonite valgusaastate kaugusel asuvatest planeetidest ja galaktikatest [2, 3]. Kuid näiteks meditsiinis diagnostikaks kasutatav magnetresonantstomograafia [4] aitab visualiseerida inimese kehas paiknevaid kudesid ja võimaldab näha elundite sisemusse, kuhu röntgenkiired tungida ei saa. Samas igapäevaelus kasutavad paljud inimesed oluliste mälestuste jäädvustamiseks mugavaid ja käepäraseid nutitelefonide kaameraid või eraldiseisvaid digikaameraid.

Stseeni või objekti kahemõõtmeliseks jäädvustamiseks nähtava valguse lainepikkusvahemikus on vaja tavaliselt mitmepikslilist sensorit ning detekteeritud kujutis on seda teravam ja kvaliteetsem, mida suurem on mitmepikslise sensori pikslite arv ehk lahutus. Tänapäeval on mitmepiksliste sensorite lahutus näiteks nutitelefonidel jõudnud sadasse megapikslitesse. Sellele vaatamata jätkub sensorite pidev täiustumine [5]. Lisaks soovitakse laiatarbelektroonikas sensorite ristsuunalist lahutust suurendada, kuid samas soovitakse sensorite mõõtmed ja maksumus viia minimaalseks. Selleks tuleb piiratud alale veelgi rohkem pikslid mahutada, kuid tasub meeles pidada, et väiksemate mõõtmetega pikslid detekteerivad vähem valgust [6].

Mõnedel juhtudel on sensorite kõrge lahutuse saavutamine tehnoloogiliste ja rahaliste võimaluste tõttu piiratud. Näiteks infrapuna lainepikkusvahemikus on pikslite mõõtmed ja maksumus suuremad, mille tõttu on selles spektriosas töötavad mitmepikslised matriksensorid madala lahutusega ning kallimad. Lisaks on olemas ajalise lahutusega sensorid, mis on tänapäeval levinud isejuhtivates autodes ja nende navigeerimiseks kasutatavares lidarites [7]. Sarnaselt infrapuna sensoritele on ajalise lahutusega sensorid tavaliselt madala lahutusega ja märgatavalt kallimad. Ajalise lahutusega sensorite pikslid on küll väga tundlikud, kuid nende pikslite detekteerivate alade ümber on palju aja mõõtmiseks vajalikku elektroonikat, mistõttu pole võimalik pikslid tihedalt paigutada.

Üksikpiksli kuva (*single-pixel imaging*) [5, 8] osutub kasulikuks rakendustes, kus praegu on ainsaks lahenduseks kasutada madala lahutusega mitmepikslilisi või ühepikslilisi sensoreid. See meetod võimaldab ühepikslilist detektorit ja struktureeritud valgust kasutades rekonstrueerida objektist kujutis, mille ristsuunaline lahutus on suurem kasutatava detektori pikslite arvust. Üksikpiksli kuval on kaks alammeetodit, arvutuslik kummituskuva (*computational ghost imaging*) [9] ja üksikpikslikaamera (*single-pixel camera*) [8], mida

selle töö käigus uuritakse. Arvutusliku kummituskuva puhul valgustatakse objekti struktureeritud valgusvälja ehk valgusmustritega, kuid üksikpikslikaamera puhul moduleeritakse objektilt peegeldunud valgust. Seega on valguse käik kahe kuvamiseetodi puhul vastupidine.

Lõputöö eesmärgiks on võrrelda arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodeid ning kuidas eksperimentaalsete parameetrite varieerimine mõjutab nende meetodite abil mõõdetud objektide kahemõõtmelisi kujutisi. Meetodite matemaatiline identsus lubab sooritada pööratavuse katse, kus vastavalt meetodile vahetatakse detektori ja valgusallika asukohad. Identsete eksperimendivahendite kasutamisel eeldatakse, et välisvalgustusega eksperimendi puhul on arvutusliku kummituskuva tulemused ekvivalentsed üksikpikslikaamera meetodi tulemustega. Välisvalgusega eksperimendi korral oodatakse, et üksikpikslikaamera kuvamiseetodi tulemused on paremad kui arvutusliku kummituskuva mõõtetulemused, sest välisvalgustuse kasutamine võib üksikpikslikaamera meetodi eksperimendis suurendada detektorile jõudva signaali väärtust.

Bakalaureusetöö teoreetilises osas antakse ülevaade arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodite teoreetilisest taustast, kasutatavatest valgusmustritest, kujutise rekonstrueerimisest nende mustrite abil ning eksperimentides leiduvast müra. Töö praktilises osas antakse ülevaade kasutatavatest meetoditest ja eksperimentaalses osas läbi viidavast pööratavuse katsest ehk mõlema kuvamiseetodi eksperimendist. Eksperimentide tutvustamise käigus räägitakse põhjalikult erinevate objektide ja parameetritega sooritavatest mõõtmistest. Viimases osas analüüsitakse saadud mõõtmistulemusi mõõdetud objektide kaupa.

1 Teoreetilised alused

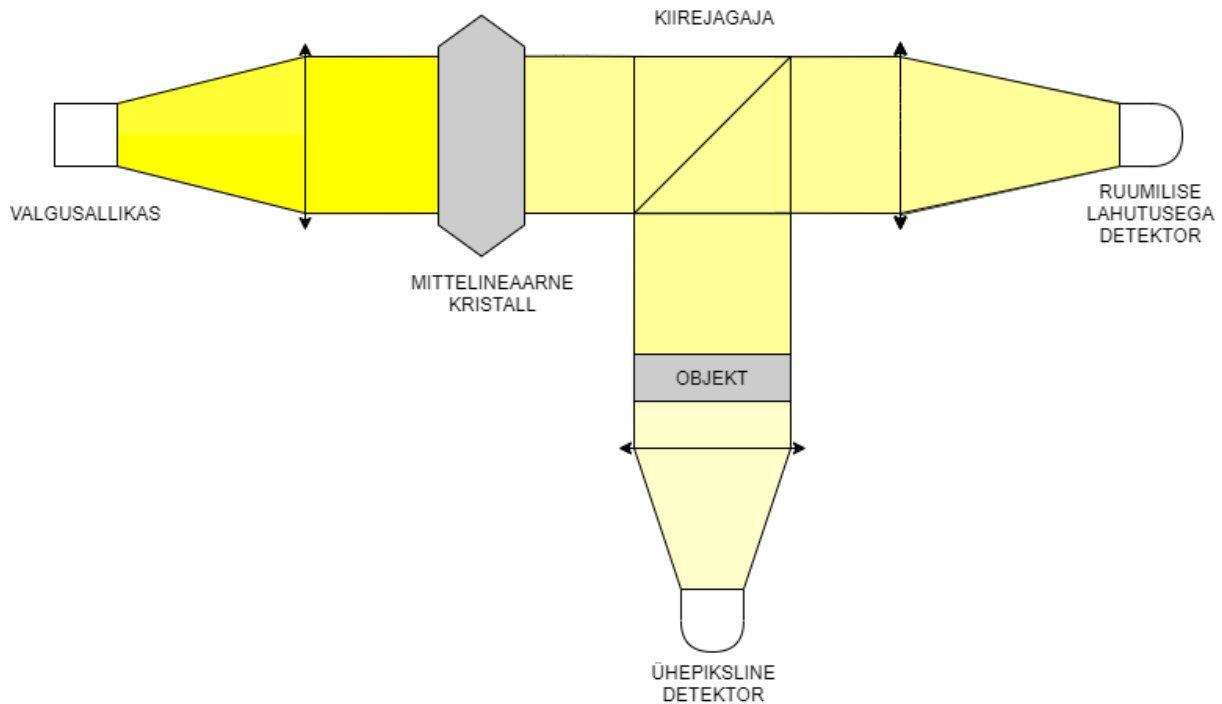
Selles peatükis antakse esmalt ülevaade üksikpiksli kuvast. Detailsemalt käsitletakse kahte kuvamisviisi – üksikpikslikaamera meetodit ja arvutuslikku kummituskuva. Lühülevaade antakse ka nimetatud meetoditele ajaliselt eelnenud klassikalise ja kvantkummituskuva põhimõttelisest toimimisest. Seejärel tutvustatakse Hadamard'i maatriksite abil valgusmustrite tekitamist, seletatakse kujutise rekonstrueerimist ning lõpetatakse kirjeldusega eksperimentides esinevast müra.

1.1 Üksikpiksli kuva

Üksikpiksli kuvaks [5] nimetatakse meetodeid, kus valgustatavast objektist rekonstrueeritakse kahemõõtmeline kujutis objektilt langenud valguse moduleerimise ja ühepikslise detektori abil. Tegelikult on võimalik rekonstrueerida ka kolmemõõtmilisi kujutisi, kuid selleks on vaja ajalise lahutusega sensorit. Ühepikslise detektoriga kuvamisviis võimaldab rekonstrueerida kujutist, mille lahutus on suurem kui kasutatava detektori lahutus. Üksikpiksli kuva mõistes tähendab kujutise rekonstrueerimine seda, et objektist saadakse kujutis arvutuslikult valgusvälja moduleerimiseks kasutatud mustrite ja ühepikslise valgusdetektori mõõdetud signaali abili, mis vastavate mustritega seostatakse. Üksikpiksli kuvaga seoses räägitakse vahel ka kompressiivsest kuvast (*compressed sensing*) [10, 11], mis uurib, kuidas vähendada kujutise rekonstrueerimiseks vajalikku mustrite arvu. Kompressiivse kuva signaalitöötlemise tehnika jäetakse selles lõputöös kõrvale, sest põhiliselt võrreldakse töös arvutuslikku kummituskuva [9] ja üksikpikslikaamerat [8].

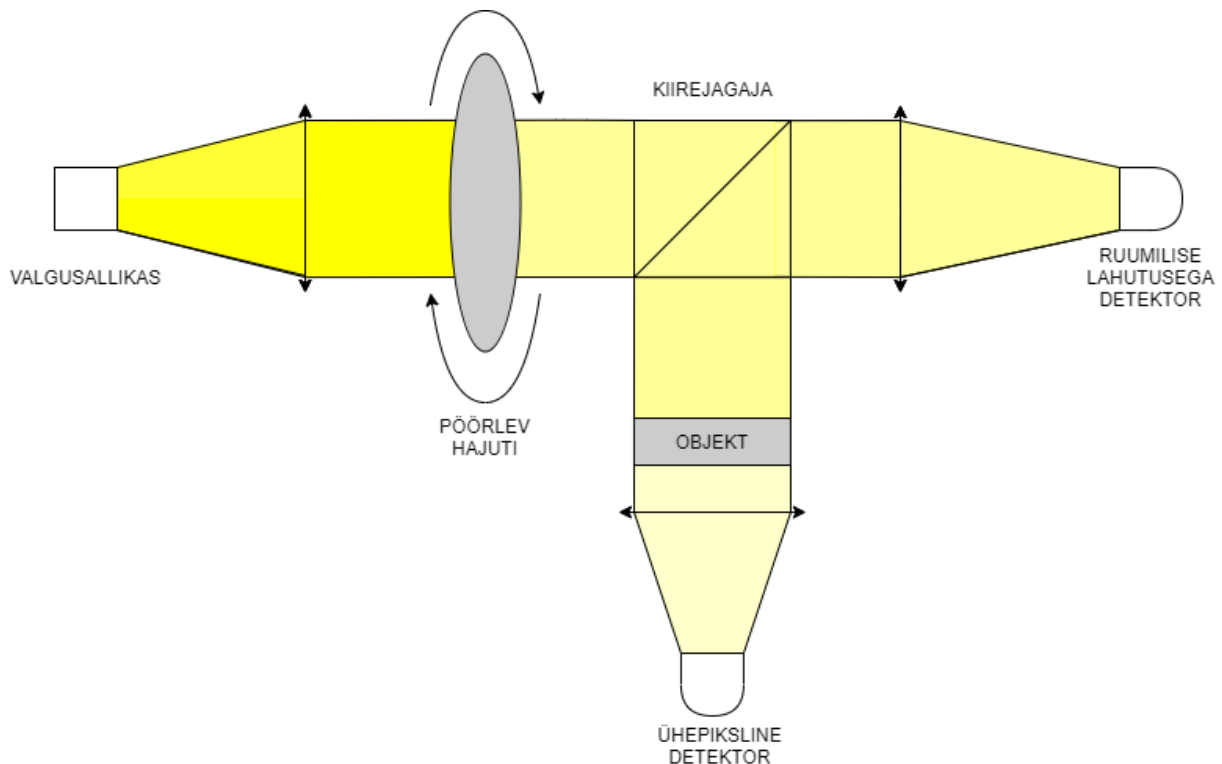
Kummituskuva meetodi puhul saavutatakse kujutise rekonstruktsioon, valgustades objekti struktureeritud valgusega ehk valgusmustritega ning mõõtes objektilt peegeldunud või objekti läbinud valguse intensiivsust ühepikslise detektoriga. Kummituskuva jaguneb põhimõtteliselt kolmeks eraldi meetodiks: kvant-, klassikaline ja arvutuslik kummituskuva.

Kvantkummituskuva (joonis 1.1) [12] ja klassikaline kummituskuva (joonis 1.2) [13] arenesid välja varem kui arvutuslik kummituskuva [14] ning vajavad mõlemad objekti rekonstrueerimiseks kaht detektorit. Kusjuures üks detektoritest peab olema ruumilise lahutusega mitmepiksliline maatriksensor.



JOONIS 1.1: Kvantkummituskuva katse skeemis tekitatakse mittelineaarse kristalli abil põimitud footonite paarid, mis suunatakse kiirejagajaga ühes skeemi mõõteõlas objektile ja ühepikslilisele detektorile ning teises mõõteõlas otse mitmepikslilisele detektorile.

Kvantkummituskuva puhul juhitakse valgusallikast tulev valgus esmalt läbi mittelineaarse kristalli, mis tekitab mõningaid põimitud footonite ehk korreleeritud lainefunktsioonidega footonite paare. Seejärel jaotatakse kiir kaheks: üks kiir saadetakse suure ruumilise lahutusega detektorile, mille abil mõõdetakse valgusmusteri intensiivsusjaotus ja teine kiir saadetakse objektile, millest läbivat valgust mõõdetakse üksikpiksli detektoriga. Selle kuvamise meetodi skeemis paiknevad mõlemad detektorid kiirejagajast võrdsel kaugusel ja seega jõuavad põimitud footonid detektoritele samaaegselt. Lahutusega detektoril registreeritakse vaid mõlemale detektorile langenud põimitud footonite jaotus, millest saab detektori koordinaadistikus objekti läbilaskvuse funktsioon. [12] Kvantkummituskuva meetodi puhul valgus, mis langeb suure ruumilise lahutusega detektorile ja mille abil objekt lõpuks rekonstrueeritakse, ei interakteeru kunagi objekti endaga [14]. Sellest tuleneb ka nende kuvamise meetodite algne nimetus – kummituskuva. Kui footoni registreerib vaid üks detektor, siis jäetakse antud lugem taustamürana arvutustest kõrvale. Tänu sellele on kvantkummituskuva signaali-müra suhe üldjuhul parem kui järgnevalt tutvustataval klassikalisel kummituskuval, kus müra niiviisi eristada pole võimalik.



JOONIS 1.2: Klassikalise kummituskuva skeemis liigub valgus esmalt läbi pöörleva hajuti, mis tekitab speklimestreid. Kiirejagajaga suunatakse osa valgust mitmepikslisele detektorile ja teine osa, mis interakteerub ka objektiga, ühepikslisele detektorile.

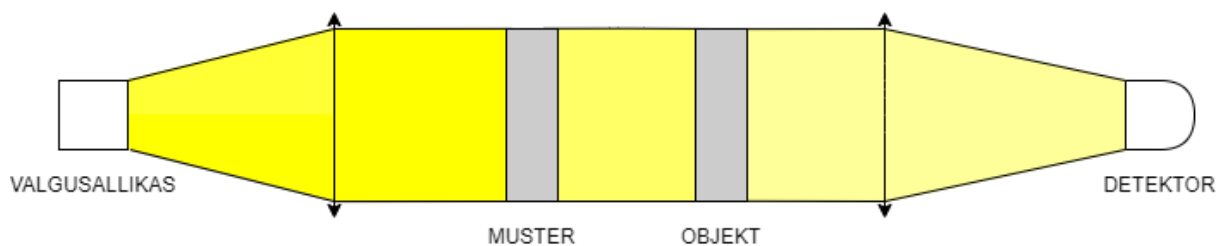
Klassikalise kummituskuva [15–17] põhiliseks erinevuseks võrreldes kvantkummituskuva on valgusallikast tuleva valguse juhtimine läbi pöörleva hajuti, mis tekitab ajas muutuvaid speklimestreid. Speklimester tekib, kui koherentsed laine frondid interfereeruvad pöörleva hajuti läbimisel. Sarnaselt kvantkummituskuvale jaotatakse valgusallikast tulev kiir kaheks: ühes mõõteõlas mõõdetakse pöörleva hajutiga tekitatud valgusmustrit suure lahutusega mitmepikslilise maatriksdetektoriga ja teise mõõteõlga paigutatakse mõõdetav objekt, mida valgustatakse nende samade valgusmustritega ja millest läbinud valgust mõõdetakse ühepikslise detektoriga. Kahe detektori mõõdetud valguse intensiivsused korrigeeritakse ja tulemuseks on objekti läbilaskvuse funktsioon ehk sisuliselt objekti kujutis [18].

Viimasena arenes välja arvutuslik kummituskuva, mis on eelnevate meetodite edasiarendus ja mida selle töö raames uuritakse. Arvutusliku kummituskuva puhul ei pea tekitatud mustreid eraldi mõõteõlas mõõtma, sest mustreid ei tekitata juhuslikult nagu klassikalises kummituskuvas, kus kasutatakse pöörlevat hajutit, vaid mustrid on juba eelnevalt eksperimentaatori poolt genereeritud ja seega eksperimendi läbiviijale ning juhtarvutite teada. Esimene selle teemaline artikkel, kus kummituskuva eksperimendis kasutati mustritega valgustatud objekti mõõtmiseks vaid ühte ühepikslilist detektorit, avaldati 2008. aastal [9] ning sellest meetodist on täpsemalt juttu järgmises alapeatükis.

1.1.1 Arvutuslik kummituskuva

Arvutusliku kummituskuva võimalike rakenduste hulk on peale ameeriklase J. Shapiro [9] artikli avaldamist ja kummituskuva nähtuse kvantolemuse ümberlökkamist jõudsalt kasvanud. Kummituskuva meetodi kohandatavus võimaldab kuvada ebatavalistes või raskestatud oludes nagu näiteks vee all [19, 20], suure turbulentsi korral [21, 22] või miks ka mitte reaajas [23, 24].

Arvutusliku kummituskuva (joonis 1.3) põhiline ja väga oluline edasiarendus võrreldes kvant- ja klassikalise kummituskuvaga on valgusmustrite teadlik loomine. Arvutusliku kummituskuva puhul valgustatakse objekti esmalt struktureeritud valgusega ehk valgusmustritega. Eelnevalt kindla algoritmi järgi genereeritud valgusmustrid tagavad, et erinevate mustrite korral on erinevad osad objektist valgustatud ja kuna objektile langevad valgusmustrid on juba eelnevalt teadlikult loodud, ei ole vaja valgusallikast tulevat valgust kaheks jagada ja valgusmustrite intensiivsust eraldi mõõteõlgades mõõta [18]. Seejärel mõõdetakse objektiga interakteerunud valguse intensiivsust ühepikslilise detektoriga. Ühepiksliline detektor registreerib tema pinnale jõudnud valguse intensiivsuse ning teades konkreetset mustrit, millega parasjagu objekti valgustati, on võimalik mitmete mõõtmistega arvutuslikult tuletada objekti kujutis. Minimaalselt on arvutuslikus kummituskavas N -pikslise rekonstruktsiooni puhul vaja sooritada N mustriga mõõtmist [25, 26].



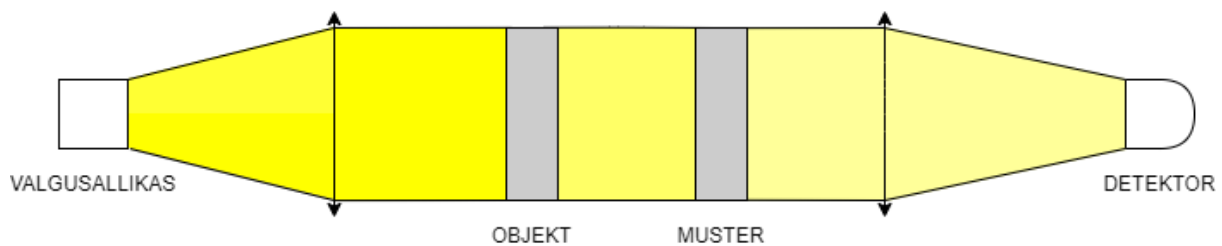
JOONIS 1.3: Arvutusliku kummituskuva lihtsustatud skeemis läbib valgus esmalt arvutiga juhitavat amplituudmaski, mis tekitab valgusmustri, läbib seejärel objekti ja jõuab siis detektorile. Ühepikslise sensoriga mõõdetakse sensorile langenud valguse intensiivsus ning seostatakse mõõdetud intensiivsus kindla, juba eelnevalt genereeritud mustriga.

1.1.2 Üksikpikslikaamera

Esimesed üksikpiksli kaamera katsetused leidsid aset samuti 2008. aastal [27]. Tänu optoelektroniliste sensorite, muuhulgas laengukogumisseadmete, pidevale ja kiirele arengule, on võimalik üksikpikslikaamera meetodit kasutada mitmetel erinevatel otstarvetel ning eksperimenteerida nii erinevates lainepikkusvahemikes [28, 29] kui ka kahe- ja kolmemõõtmelises kuvas [30, 31].

Erinevalt arvutuslikust kummituskuvast valgustatakse üksikpikslikaamera meetodi puhul esmalt objekti ja seejärel moduleeritakse objektiga interakteerunud valgust eelnevalt

genereeritud mustritega (joonis 1.4). Põhimõtteliselt ei pea üksikpikslikaamera eksperimendi puhul eraldi valgusallikat kasutama, sest kahemõõtmelise kuva saamiseks piisab ka loomulikust välisvalgusest [27]. Peale objekti valgustamist ning järelejäänud valguse moduleerimist valgusmustritega, detekteerib ühepikslise sensor talle langenud valguse intensiivsuse. Identselt arvutuslikule kummituskuvale, kui on teada konkreetsed mustrid ja neile vastavaid moduleeritud valguse intensiivsused, rekonstrueeritakse mõõdetud objektist kujutis.

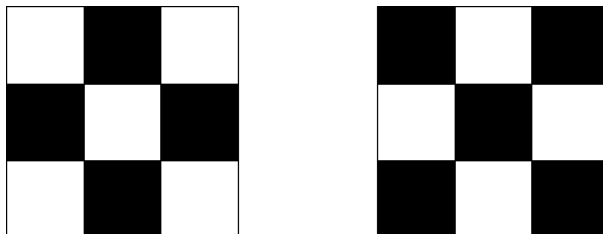


JOONIS 1.4: Üksikpikslikaamera lihtsustatud skeemis on võrreldes arvutusliku kummituskuva eksperimendiga objekti ja mustri asukohad skeemis vahetunud. See tähendab, et valgus langeb esmalt objektile, seejärel moduleeritakse valgust lisaks valgusmustritega ja viimaks langeb järelejäänud valgus ühepikslisele detektorile.

1.2 Mustrite tekitamine

Mõlema kuvamismeetodi jaoks on valgusmustreid võimalik tekitada ja kuvada mitmeti. Üks võimalus valgusmustrite tekitamiseks on näiteks laserkiire juhtimine läbi pöörleva hajuti, mis tekitab speklimumstreid [15], nagu on minevikus toiminud klassikalise kummituskuva puhul [14]. Lisaks on võimalik mustreid tekitada ja kuvada näiteks projektori ja peegelduva mikropeeglite maatriksi abil. Sellel põhimõttel töötavad peaaegu kõik tänapäevased videoprojektorid.

Nii arvutusliku kummituskuva kui üksikpikslikaamera meetodi korral on tähtis mõõdetava objekti rekonstrueerimiseks vajalike ja ka sobivate mustrite valik. Matemaatiliselt saab selliseid valgusmustreid kujutada maatriksitena, kus valgustatud pikslid on märgitud arvuga üks ja valgustamata pikslid arvuga null [18]. Diferentsiaalsete mustrikomplektidega mõõtmistel tekitatakse ühest mustrist kaks mustrit, kus üks on teise vastandmuster (joonis 1.5). Vastandmustrite abil saab vähendada mõõtmistel tekkivat juhuslikku müra ja seeläbi parandada rekonstrueeritud pildi kvaliteeti. Eeldusel, et taustamüra muutub piisavalt aeglaselt, et mustri ja vastandmusteri kuvamise ajal saab müra peaaegu konstantseks lugeda, saab taustamüra vastandmustrite ehk diferentsiaalse mustrikomplekti kasutamise abil välja arvestada.



JOONIS 1.5: Muster ja tema vastandmuster. Selle mustri kasutamisel valge objekti valgustamiseks jõuab ühepikslisele sensorile normeeritult intensiivsus 0.56, vastandmusteri korral 0.44. Vastandmustrite kasutamisel valgustatakse tervet objekti ühtlaselt.

Kuvatavate mustrite genereerimisviis ja lahutus mõjutavad mõlemad müra-signaali suhet ja mõõtmiste aega. Mida suurem on kuvatavate mustrite lahutus, seda rohkem väheneb rekonstrueeritava kujutise kvaliteet ja seda rohkem suureneb mõõtmistele kuluv aeg [32]. Kasutades suvaliselt genereeritud mustreid, võib juhtuda, et erinevaid osi objektist ei valgustata piisavalt. Objekti ebaühtlane valgustamine vähendab omakorda rekonstrueeritava kujutise kvaliteeti [26].

Selleks, et kasutada minimaalsel arvul mustreid ja optimeerida mõõtmisaega, tuleb kasutada mustreid, mis on omavahel lineaarselt sõltumatud. Objektist kindla lahutusega rekonstruktsiooni saamiseks on vaja minimaalselt samapalju mustreid kui on rekonstrueeritud pildil piksleid [25, 26]. Suvaliselt genereeritud mustritega, mis ei moodusta ortogonaalset baasi, on mõõdetava objekti rekonstrueerimiseks vajalike mustrite arv palju suurem. Maatriksi ortogonaalne baas tähendab, et tema baasivektorid on risti, ehk skalaarkorrutis kahe baasvektori vahel on 0. Baasi ortogonaalsus on kasulik just sellepärast, et aitab tagada parima signaali-müra suhte [18].

1.3 Hadamard'i maatriksid

Selle töö puhul mustrite tekitamiseks optimaalseim kasutada Hadamard'i baasile ehitatud maatrikseid, mis tagavad mustrite ühtlase jaotuse. Valgusmustrite ühtlane jaotus on oluline, et ükski objekti osa ei saaks liialt palju või liialt vähe valgustatud ning ära tuntavat kujutist oleks üldse võimalik rekonstrueerida. Hadamard'i maatriksiks nimetatakse sellist ruutmaatriksit, mille elementideks on vaid ühed ja miinus ühed ning mille read ja veerud moodustavad ortogonaalse baasi [18].

Selleks, et saada N -pikslilist kujutist minimaalse arvu mustrite ja sellest tulenevalt minimaalse mõõtmisajaga, on vaja moodustada N mustrit [25, 26]. See kehtib mittediferentsiaalse ehk vastandmustriteta kuvamise korral. Niisiis mida kõrgema lahutusega kujutist soovitakse rekonstrueerida, seda rohkem on vaja erinevaid mustreid kuvada [32]. Palju erinevaid mittediferentsiaalseid mustreid põhjustab aga suurema juhusliku müra, mis samas diferentsiaalsete mustripaaride kasutamise korral on võimalik maha taandada. Diferentsiaalsete mustrite ehk vastandmustripaaride kasutamisel on vaja teha aga kaks

korda rohkem mõõtmisi kui mittediferentsiaalsete mustrite kasutamisel ja seega pikeneb ka mõõtmisaeg kaks korda.

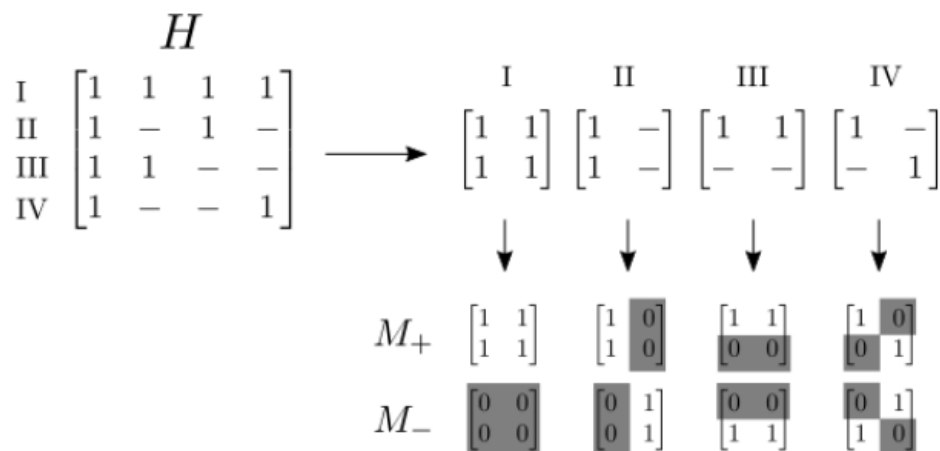
Väikseim võimalik Hadamard'i maatriks on teist järku:

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

kus H tähistab Hadamard'i maatriksit ja alaindeks näitab maatriksi järku. Hadamard'i maatrikseid võib konstrueerida erinevalt. Vastavalt otstarbele saab kasutada näiteks Sylvesteri, Paley või Williamsoni konstruktsioone. Bakalaureusetöös kasutatav Sylvesteri konstruktsiooniga Hadamard'i maatriksi eeskiri näeb välja järgmine:

$$H_{2^k} = \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix},$$

kus k on ühest suurem positiivne täisarv [25].



JOONIS 1.6: Hadamard'i maatriksist mustrite tegemisel moodustatakse esmalt igast Hadamard'i maatriksi reast eraldi maatriks, kus maatriksi -1 (joonisel tähistatud „-“) käsitletakse 0-dena ja igale mustrile koostatakse ka vastandmuster.[18]

Hadamard'i maatriksi põhjal moodustatakse nii mittediferentsiaalsed kui ka diferentsiaalsed valgusmustrid (joonis 1.6). Hadamard'i maatriksid sisaldavad üksteisega identseid aga vastupidiseid komponente üks ja miinus üks. Valgusmustrite moodustamisel muudetakse miinus ühed aga nullideks, nagu toodud ka joonisel. Miinus ühted tuleb asendada nullidega, sest pole võimalik tekitada negatiivset valgusvälja. Hadamard'i maatriksite read on omavahel ortogonaalsed ja seetõttu saavad iga Hadamard'i maatriksi rea või veeru elemendid moodustada eraldi maatriksid, mille põhjalt koostatakse diferentsiaalse kuvamise jaoks muster ja tema vastandmuster (joonis 1.5). Mittediferentsiaalse kuvamise korral

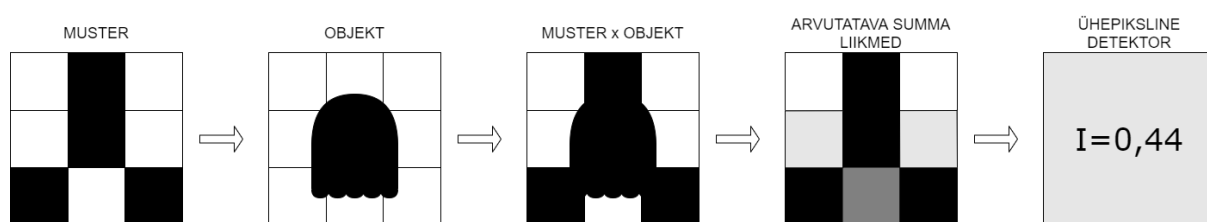
moodustatakse sarnaselt igast reast üks muster, kuid vastandmustrit enam ei moodustata. Näiteks esimese maatriksi rea moodustavad ühed, mis tähendavad valget/valgustavat pikslit. Esimesest reast moodustatud alamaatriks, kus kõik elemendid on ühed, tähistab mustrit, mida kasutatakse mittediferentsiaalsel kuvamisel. Kui sellest maatriksist moodustada vastandväärtustega maatriks, saab seda nimetada vastandmustriks. mida kasutatakse koos esimese moodustatud mustriiga diferentsiaalsel kuvamisel.

1.4 Kujutise rekonstrueerimine

Selles peatükis näitlikustatakse kujutise rekonstrueerimist arvutusliku kummituskuva meetodiga. Nagu eelnevalt juba mainitud, on üksikpikslikaamera tööpõhimõtte matemaatiliselt sama, kuid eksperimentaalselt on valguse teekond vastupidine. Arvutusliku kummituskuva puhul läbib valgusallikast lähtuv valgus mustri. Mustril on kujutatud valged pikslid, mis on valgustatud ja mustad pikslid, mis on valgustamata. Seega saab valgus objektile levida vaid valgustatud pikslite kaudu. Kui valgus on levinud objektini, toimib objekt justkui teine muster, mis on kõikide mõõtmiste puhul konstantne. Seega blokeerib objekt valguse edasise leviku nendelt pikslitelt, kus objekt kas täielikult või mingil määral asub. Lõpuks detekteerib üksikpiksli sensor ühe kindla mustri jaoks valguse intensiivsuse (joonis 1.7). Matemaatiliselt tähendab see seda, et saamaks ühepikslise sensoriga detekteeritud mustriile vastavat valguse intensiivsust, summeeritakse ühe mõõtmise korral vastavalt mustri ja objekti "pikslite" korrutised pikslite kaupa:

$$S^k = \sum_{ij} O_{ij} \cdot M_{ij}^k,$$

kus S on detekteeritav valguse intensiivsus, O tähistab objekti, M tähistab mustrit, i ja j on piksli rea ja veeru numbrid ning k on mustri indeks.



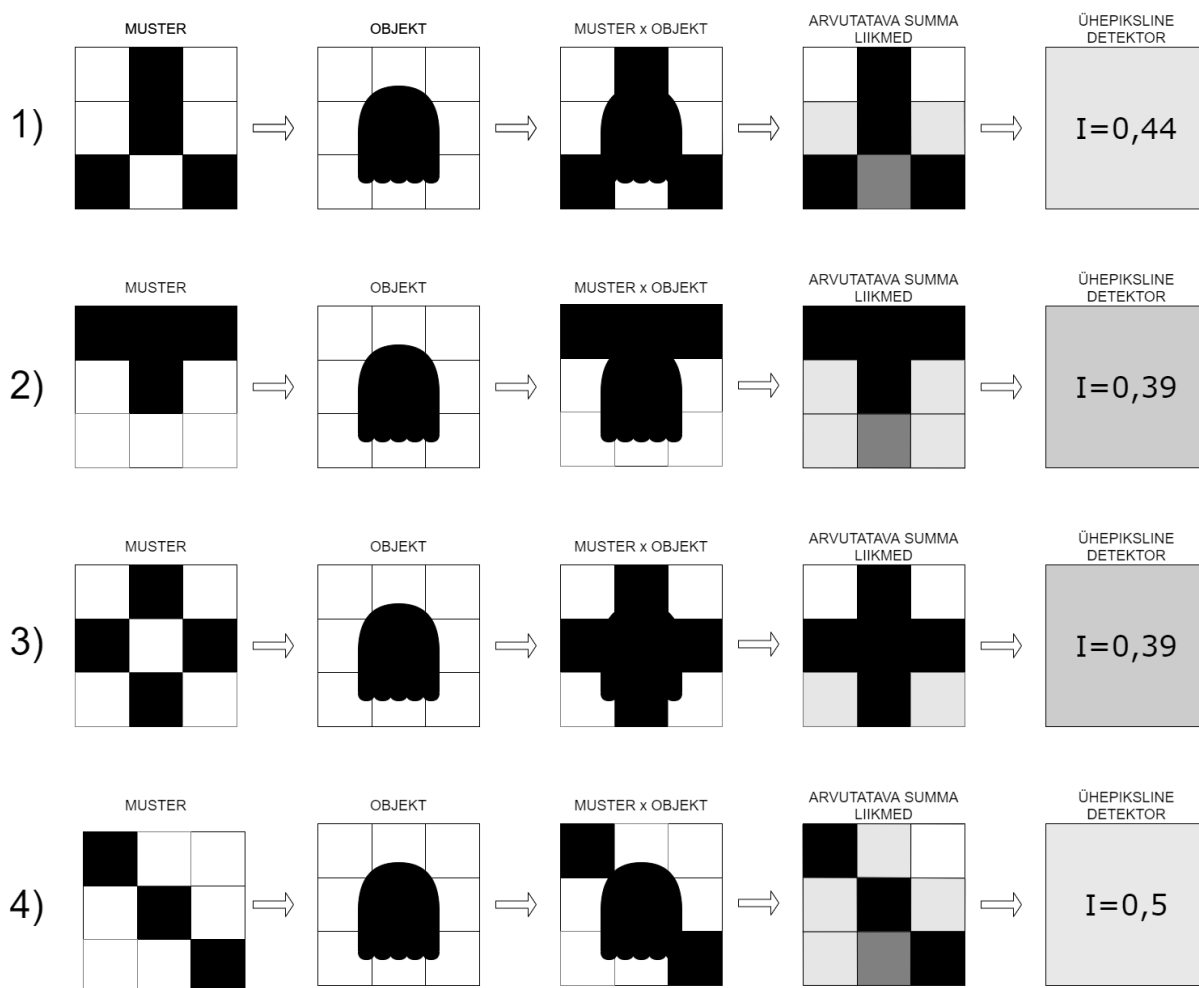
JOONIS 1.7: Ühe kindla mustriiga objekti valgustades jõuab detektorile kujutis, kus rohkem valgustatud on need osad, mis on nii mustril kui objektil valged. Ühepikslilise detektori korral registreeritakse kujutise summaarne intensiivsus.

Arvutatava summa liikmed avalduvad konkreetsetel joonisel nii, et vaid kaks pikslit on täiesti valgustatud, neli pikslit on valgustamata, üks piksel on justkui pooleldi valgustatud ja kaks pikslit on 75% valgustatud. See tähendab, et ühepiksliline sensor registreerib

normeeritud valguse intensiivsuse järgmiselt:

$$I = \frac{\text{heleda osa pindala}}{\text{kogupindala}} = \frac{4}{9} \approx 0,44.$$

Kuid iga mustri korral on detektorile jõudnud valguse intensiivsus erinev (joonis 1.8) ja samuti erineb kujutise rekonstrueerimiseks vajalike mustrite arv mustrikomplektide varieerimisel. Mittediferentsiaalse meetodi korral on N -pikslise kujutise saamiseks vaja mõõdetavale objektile kuvada N mustrit [26, 32]. Differentsiaalse kuvamise ehk vastandmustritega kuvamise korral on N -pikslise kujutise saamiseks vaja mõõdetavale objektile kuvada $2 \cdot N$ mustrit ehk N mustripaari [33]. Differentsiaalsekuvamisega pikeneb mõõtmisele kuluv aeg seega kaks korda.



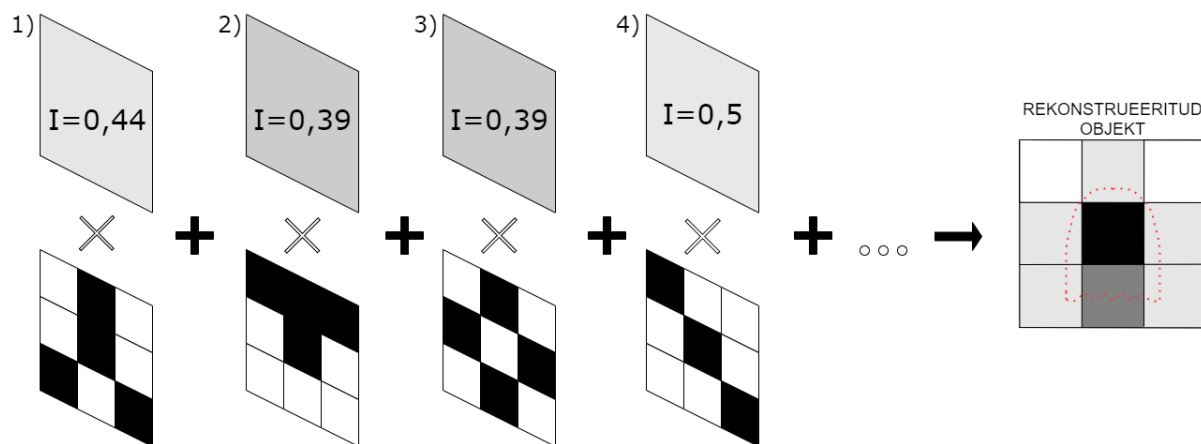
JOONIS 1.8: Erinevate mustrite korral on valgustatud objekti erinevad osad, mis põhjustavad iga ühepikslilise detektoriga mõõtmise jaoks erineva intensiivsuse väärtuse.

Kujutise rekonstrueerimine valgusmustrite ja neile vastavate mõõdetud intensiivsuste abil saab arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodi puhul toimuda identselt.

Selleks, et mõõdetud signaali abil kujutist rekonstrueerida, on mitu võimalust. Iteratiivse meetodi korral liidetakse kõik kasutatud mustrid neile vastavate signaalidega kaalutuna kokku [18]. Iteratiivse meetodi eeskiri näeb välja järgmine:

$$O = \langle (S - \langle S \rangle)(M - \langle M \rangle) \rangle,$$

kus O on rekonstrueeritud pilt mõõdetavast objektist, S tähistab mustritele vastavaid signaalide intensiivsusi ja M tähistab valgusmustreid [34]. Hilisemal objekti rekonstrueerimisel summeeritakse kõik ühepikslise sensoriga mõõdetud valguse intensiivsused, millega mustrid eelnevalt eraldi läbi korrutatakse (joonis 1.9).



JOONIS 1.9: Üheksapikslise objekti rekonstrueerimine mustrite ja neile vastavate intensiivsuste abil. Ühepikslise sensori poolt detekteeritud mustritele vastav intensiivsus korrutatakse mustriga ning seejärel saadud korrutised summeeritakse. Summa ongi rekonstrueeritud kujutis.

Teise võimalusena saab kujutise rekonstrueerimiseks koostada lineaarvõrrandi süsteemi, mille abil on võimalik kujutis rekonstrueerida. Ka selle lahendusmeetodi puhul on vaja teada kindla mustriga seotud detektorile jõudnud valguse intensiivsust, kuid suurte lahutuste korral on lineaarvõrrandisüsteemi kasutamine ajakulukam kui iteratiivse meetodi kasutamine. Võrrandisüsteemi eeskiri näeb välja järgmine:

$$M \cdot O = S,$$

kus M ja S on vektorid, mille elementideks on vastavalt valgusmustrid ja detekteeritud valguse intensiivsust iseloomustavad signaalid [18].

1.5 Müra eksperimentides

Lõputöö käsitluses on müra juhuslik lisasignaal, mis ei kanna endas kujutise kohta mingit infot ja tekitab rekonstrueeritavas kujutises häiritusi. Müra tekib erinevate protsesside ja

seadmete puhul erinevalt ja müra liigitatakse vastavalt signaali pärinemisele, põhisignaali mõjutusviisile ja energiajaotusele sagedusribal. Üksikpiksli kuva eksperimentides tekivad müra peamiselt valguse peegeldumine mikropeeglite maatriksilt, ühepikslise detektor ja valgustamisest tulenev taustamüra [32].

Müra iseloomustatakse tihti signaali-müra suhtega ehk SNR-ga (*signal-to-noise ratio*):

$$SNR = \frac{\bar{O}}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_n},$$

kus \bar{O} tähistab pildisignaali keskväärtust üle kõigi pisklite ja σ ning σ_n tähistavad vastavalt standardhälvet ja normeeritud standardhälvet. Standardhälve ja tema normeeritud versioon avalduvad vastavalt

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (O_i - \bar{O})^2},$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (O_{ni} - \bar{O}_n)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (O_{ni} - 1)^2},$$

kus N on rekonstrueeritava pildi pisklite arv ja i iseloomustab, mitmenda mõõdetud signaaliga tegemist on.

Seega on signaali-müra suhe pöördvõrdelises seoses rekonstrueeritava kujutise pikslite arvu ruutjuurega, mis tähendab, et lahutuse suurenemisega suureneb ka müra [32]. Iga rekonstrueeritava kujutise alaliskomponendi määrab valge mustriga tehtud mõõtmine, sest sõltumata lahutusest on esimene mõõtmine alati valge mustriga. See eripära tuleneb Sylvesteri konstruktsioonist. Ülejäänud mustritega mõõtmistest saadud signaalid summeeritakse kujutise rekonstrueerimiseks. Alaliskomponendile liidetavad signaalid panustavad nii kujutise rekonstrueerimiseks vajalikku signaali kui ka mürasse, mistõttu signaali-müra suhe halveneb iga mustri lisamisega. Rekonstrueeritava pildi lahutusega kasvava signaali-müra suhte tõttu on sõltuvalt rakendustest üksikpiksli kuva laialdane kasutuselevõtt piiratud. Signaali-müra suhet on üksikpiksli kuva eksperimentides püütud mitmel viisil parandada [32, 35], kuid üheks lihtsamaks lahenduseks müra vähendada, on sooritada mõõtmised diferentsiaalsete mustrikomplektide abil [33]. Diferentsiaalsete mustrikomplektide kasutamine annab müra vähendamise osas teatava eelise mittediferentsiaalsete mustrite kasutamise ees. Vastandmustrite kuvamise käigus on võimalik vähendada juhuslikku konstantset taustamüra ehk roosat müra [18].

2 Meetodid

Bakalareusetöö eksperimentaalse osa eesmärkideks on diferentsiaalsete ja mittediferentsiaalsete mustrikomplektide kasutamise, välisvalgustuse otstarbekuse ja rekonstrueeritava kujutise lahutuse ja müra suhte uurimine kahe erineva üksikpiksliku meetodi puhul ning nende kuvamismeetodite võrdlus. Võrdsuse eesmärgil sooritatakse eksperimentaalses osas nii-öelda pööratavuse katse. Pööratavuse katse puhul saab lihtsate võtetega muuta arvutusliku kummituskuva eksperimendi skeemi üksikpikslikaamera meetodi eksperimendi skeemiks ehk ühe kuvamise viisi teiseks kuvamise viisiks ning selle teeb võimalikuks kuvamismeetodite kujutise rekonstrueerimise matemaatiline identsus. Kuvamisviisi muutmiseks on vaja vahetada vaid detektori ja valgusallika asukohad eksperimendi skeemil, kuid seejuures on vaja mõlema eksperimendi jaoks luua sarnased valgustustingimused. Lisaks valgustustingimuste ühtlustamisele on oluline kasutada eksperimentides sarnaseid eksperimendivahendeid, et lihtsustada pööratavuse saavutamist ja võimaldada tulemuste kõrvutamist.

Arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera eksperimentides kasutatakse valgusallikana valgusdiodi (LED), mustreid tekitava elemendina mikropeeglite maatriksit (DMD), ühepikslise detektorina fotodiodi ja kuvava elemendina projektori objektiivi. Detektori ja arvuti vaheliseks suhtluseks kasutatakse juhtkonsooli. Mikropeeglite maatriksi saab otse ühendada mõõtmisteks kasutatava arvutiga. Mõõdetavad objektid on kahe eksperimendi skeemi korral identsed. Nendeks on valitud valge paberileht, must paberileht valge kummituse kujutisega ja kolm valget kera.

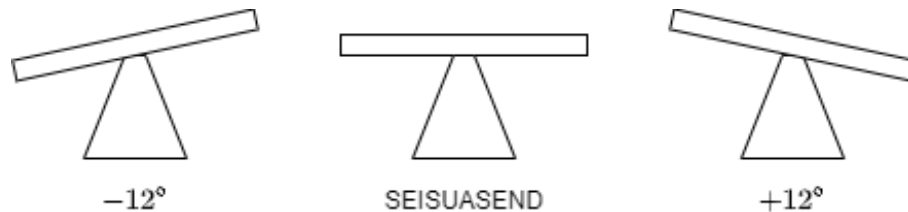
Eksperimendi meetodite peatükis tutvustatakse lähemalt eelnevalt üles loetletud eksperimendivahendeid ja mõõdetavaid objekte. Seejärel tehakse detailne ülevaade arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodi eksperimentide skeemidest, nende toimimisest ja mõõtmiste jagunemisest.

2.1 Eksperimendi vahendid

Mikropeeglite maatriks

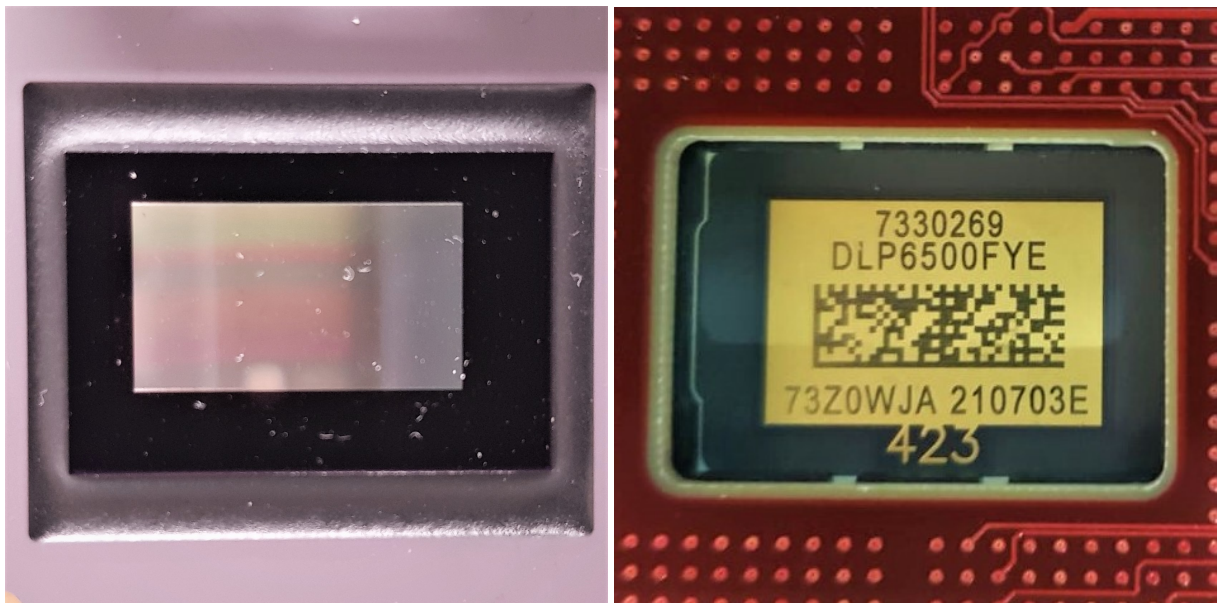
Mikropeeglite maatriks ehk DMD (*Digital Micromirror Device*) on ruumiline valgusvälja modulaator, mis võimaldab muuta sellele langeva valguse amplituudi, suunda ja/või faasi [36]. Selles töös kasutatakse valgusvälja amplituudi moduleerimist. Sellist ristikujulist kallutatavate peeglitega plaati kasutatakse peaaegu kõikides tänapäevastes (kodu)kinoprojektorites.

DMD tööpõhimõte seisneb mikropeeglite sobivas kallutamises (joonis 2.1). Iga mikropeegel kallutatakse talle vastava piksli parameetritele [37]. Kui kindlale peeglile vastav piksel on mustis valge, siis kallutatakse arvutusliku kummituskuva eksperimendi puhul peeglit nii, et valgus leviks näiteks objektiivi ja sealt edasi objektile, mida tahetakse kuvada. Kui kindlale peeglile vastav piksel on must, siis kallutatakse mikropeeglit nii, et valgus ei leviks objektiivi ja ei jõuaks mõõdetavale objektile.



JOONIS 2.1: Mikropeeglite maatriksi iga üksikpeeglit on võimalik vastavalt vajadusele kallutada seisuasendist $\pm 10 - 12^\circ$. Töös kasutatava mikropeeglite maatriksi peegleid on võimalik kallutada $\pm 12^\circ$.

Eksperimentides kasutatakse struktureeritud valguse ehk mustrite kuvamiseks Texas Instrumentsi (TI) mikropeeglite maatriksit DLP6500. Konkreetse TI DMD peegelduva alumiiniumkattega pinnal paikneb üle kahe miljoni mikropeegli, mis võimaldab kuvada mustreid maksimaalse lahutusega 1080x1920. 0.65-tollise diagonaaliga maatriksi mikropeegleid on võimalik seisuasendist kallutada $\pm 12^\circ$. [36]



JOONIS 2.2: Texas Instrumentsi mikropeeglite maatriksi DLP6500 eesmine ja tagumine külg. Parempoolselt fotolt on näha, et üksikud mikropeeglid on nii väikesed, et pole silmaga eristatavad.

Ühepiksline detektor ja juhtkonsool

Ühepikslise detektorina kasutatakse eksperimentides Thorlabsi fotodiodi S120C, millega mõõdetakse objektilt peegeldunud valguse intensiivsus. Konkreetisel ränipõhisel sensoril on suhteliselt suur valgustundlik pindala, ligikaudu 100 mm^2 ja fotodiod töötab 50 nW - 50 mW võimsusvahemikus 1 nW lahutusvõimega [38]. Sensori mõõtemääramatus lainepikkusvahemikus $400 - 439 \text{ nm}$ on $\pm 5\%$. Lainepikkusvahemikus $440 - 980 \text{ nm}$ on detektori mõõtemääramatuseks $\pm 3\%$ [38]. Suhtlust arvuti ja detektori vahel aitab pidada juhtkonsool, milleks on eksperimentides kasutatud Thorlabsi PM100D võimsus- ja energiamõõtjat [39].



JOONIS 2.3: Vasakul pildil on näha ühepikslise detektorina kasutatav, 9,5 mm diameetriga Thorlabsi fotodiod S120C. Paremal pildil on selle juhtkonsool PM100D, mis võimaldab detektori otseühendust arvutiga.

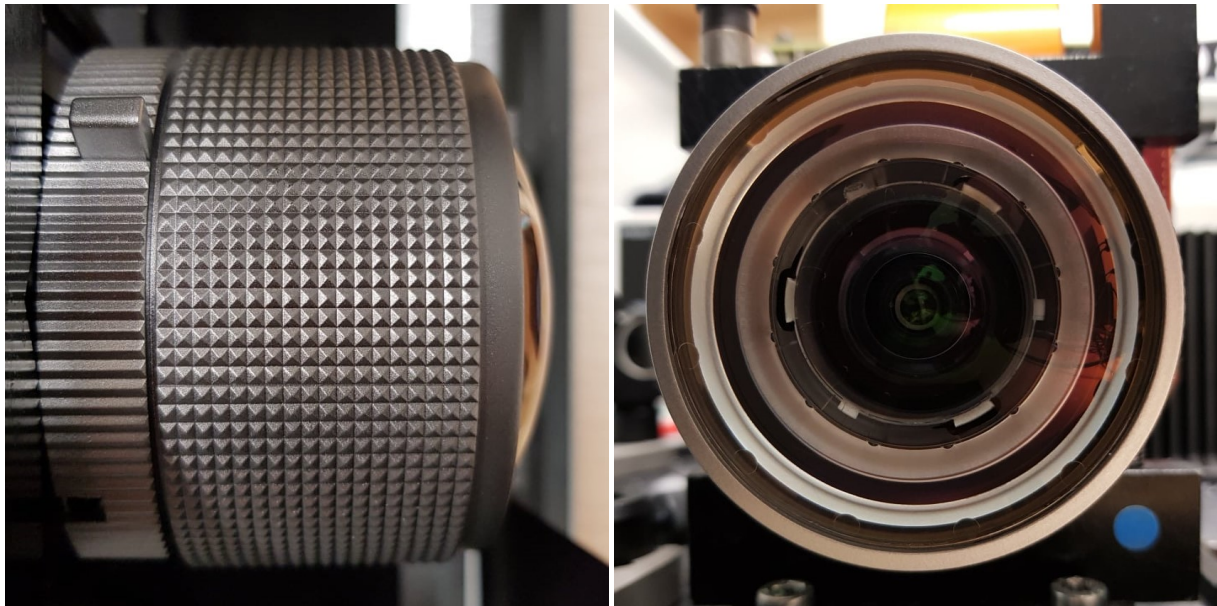
Kujutav optika ja valgusallikas

Lõputöös on üheks eksperimendi vahendiks valitud BenQ projektori HT2150ST objektiiv, millega arvutusliku kummituskuva eksperimendis kujutatakse mustrid objektile ja üksikpikslikaamera eksperimendis objektilt leviv valgus mikropeeglite maatriksile. Objektiivi fookuskaugus f jääb $10,2$ ja $12,24$ millimeetri vahele [40] ja seega saab objektiivi fookuskaugust vajadusel väikeses ulatuses muuta.

Lõputöös kasutatava objektiivi vaatevälja arvutamiseks kasutati arvutusliku kummikuskuva eksperimendi skeemi ja kuvati täiesti valge muster. Esmalt mõõdeti kuvatava 1:1 kuvasuhtega mustri ehk sellel juhul valge ruudu ühe külje pikkus a . Horisontaalne ja vertikaalne vaateväli olid seega võrdselt 92 cm . Seejärel mõõdeti objektiivi kaugus seinast (l), kuhu valget mustrit parasjagu kuvati. Vaatevälja arvutamiseks kahe mõõdetud suuruse

abil kasutati täisnurkse kolmnurga järgi defineeritud tangensit. Seega on eksperimentides kasutatava objektiivi vaateväli kraadides ligikaudu

$$\tan \alpha = \frac{a}{l} \implies \alpha \approx \arctan \frac{a}{l} \approx \arctan \frac{92}{143} \approx 36^\circ.$$



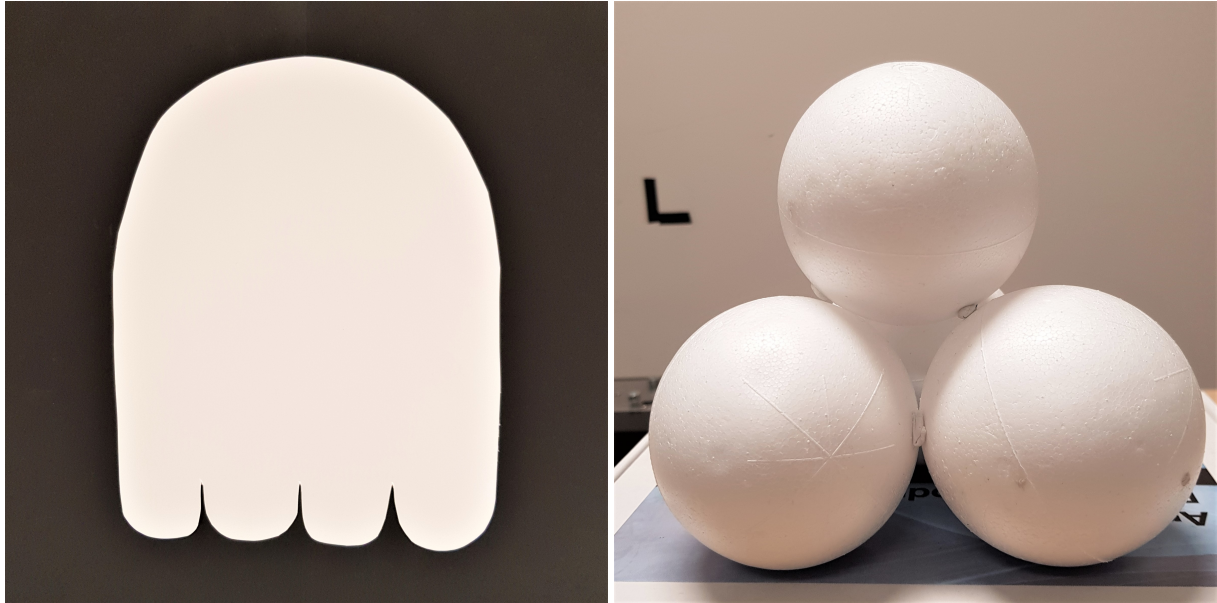
JOONIS 2.4: Mõlemas eksperimentis kuvamiseks kasutatud muudetava fookuskaugusega projektori objektiiv kahes vaates. Objektiiv aitab vastavalt kuvamismeetodile kuvada mustreid objektile või objektilt peegeldunud valgust mikropeeglite maatriksile.

Mõõdetavate objektide valgustamiseks kasutatakse lõputöö eksperimentides valget valgusdiodi ehk LED-i, mille elektriline võimsus on 1 W. Sellest võimusest läheb suur osa aga süsteemis kaduma ja sellel on mitmeid põhjuseid. Väga suur osa LED-i kuvatavast valgusest ei jõua tänu konkreetse valgusdiodi laiale vaateväljale optilisse süsteemi. Sellest valgusest, mis optilisse süsteemi jõuab, hajub osa erinevatelt süsteemi peeglitelt peegeldudes. Lisaks tekivad väikesed võimsuskaod siis, kui valgus läbib objektiivi.

Mõõdetavad objektid

Mõõdetavate objektide valiku juures on kaks olulist kriteeriumit: objektide suurus võrreldes mustrite suurusega ja objektide kaugus objektiivist. Väikese lahutusega, näiteks 16x16 piksliga, mõõtmiste korral peavad mõõdetavad objektid olema rekonstrueerimisel piisavalt hästi eristatavad. Seega on tähtis, et objektid mahuks objektiivi vaatevälja hästi ära ja ei oleks vaatevälja suhtes liiga suured ega liiga väikesed. Teiseks on oluline, et mõõdetavad objektid oleks sobival kaugusel objektiivist ja vastavalt eksperimentidele, kas detektorist või valgusallikast. Sobiva kauguse valimisel mängis rolli esmalt see, et objektilt

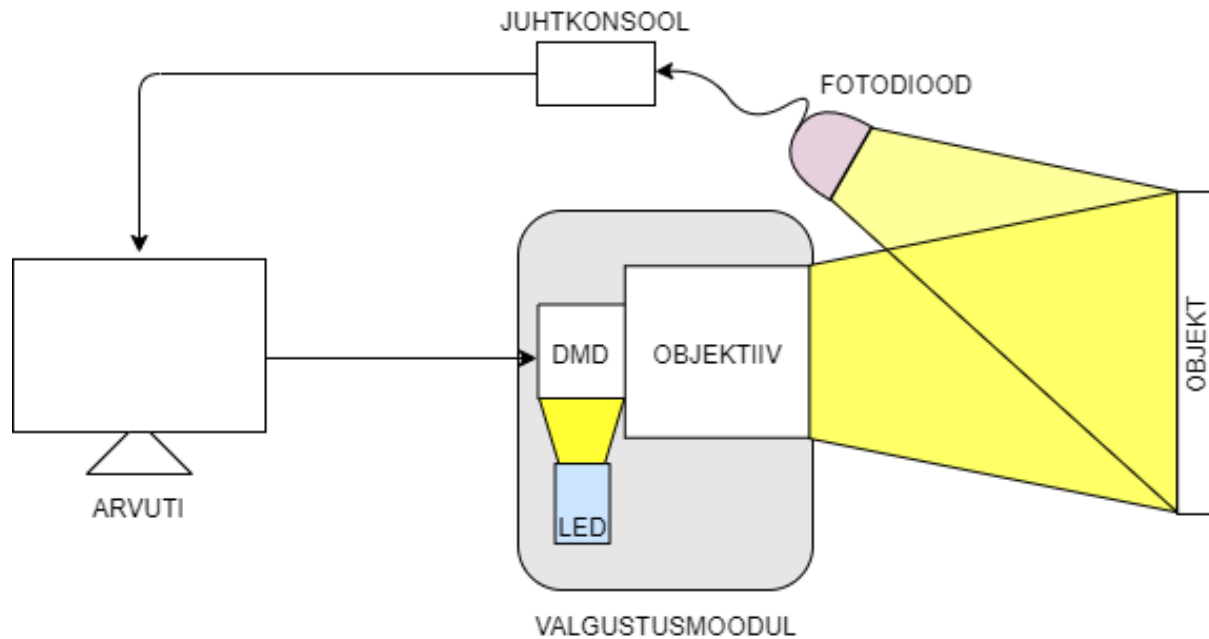
tagasi peegeldunud valguse signaali jõuaks detektorisse võimalikult palju. Teiseks oli oluline, et objektiivi oleks võimalik teravustada valitud sobivale kaugusele. Kahemõõtmelise objekti puhul sai sobivaks kauguseks ligikaudu 37 cm objektiivist, kus kuvatavad mustrid olid fookuses. Ka valge paberiga referentsmõõtmised ja kolmemõõtmelise objektiga mõõtmised sooritati samal kaugusel. Kahemõõtmeliseks objektiks valiti valge kummituse kujutis mustal taustal ja kolmemõõtmeliseks objektiks valiti kolm valget palli ilma taustata 2.5.



JOONIS 2.5: Fotod mõlemas eksperimendis mõõdetud kahemõõtmelisest (vasakul) ja kolmemõõtmelisest (paremal) objektist. Kahemõõtmeliseks objektiks valiti valge kummituse kujutis mustal taustal. Kolmemõõtmeliseks objektiks valiti kolm valget palli ilma taustata.

2.2 Arvutusliku kummituskuva eksperiment

Arvutusliku kummituskuva eksperimendis (joonis 2.6) juhitakse valgus esmalt mikropeeglite maatriksile, mis struktureerib pealelangeva valguse ehk moodustab eelnevalt arvuti abil genereeritud valgusmustrid. Seejärel suunatakse need läbi objektiivi ja kuvatakse üksteise järel mõõdetavale objektile. Objektilt peegeldunud valgus suundub ühepikslisele sensorile, mis registreerib eraldi iga üksiku mustri korral detektorile jõudva valguse intensiivsuse. Kujutise lõplikuks rekonstrueerimiseks kõik intensiivsustega seostatud mustrid summeeritakse arvuti abil.



JOONIS 2.6: Arvutusliku kummituskuva eksperimendis valgustatakse valgusdioodiga esmalt mikropeeglite maatriksit, mis struktureerib sellele jõudnud valguse. Struktureeritud valgus ehk valgumustrid peegelduvad mikropeeglitelt läbi objektiivi objektile, kust valgus peegeldub edasi ühepikslisele detektorile.

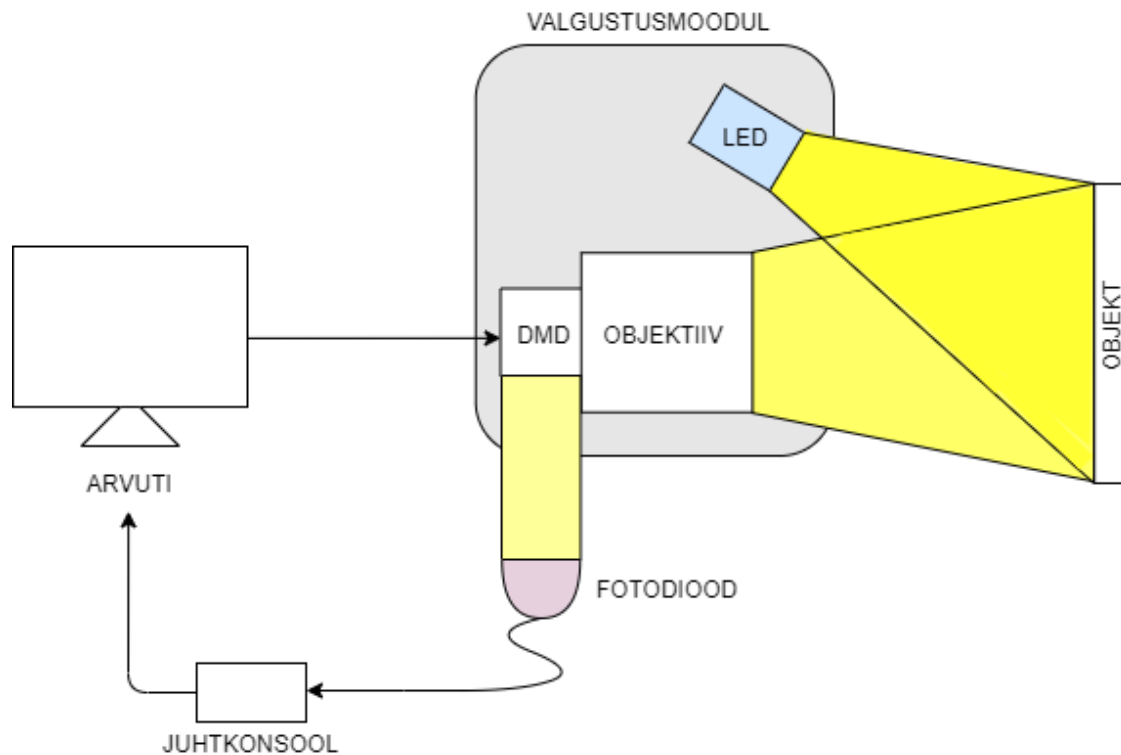
Arvutusliku kummituskuva eksperimendi skeemiga sooritatakse kokku 24 erinevat mõõtmist. Mõõtmised tehakse kolme erineva objektiga. Nendeks objektideks on valge paberileht, kahemõõtmeline objekt (must paberileht valge kummituse kujutisega) ja kolmemõõtmeline objekt (neli valget palli). Iga objektiga tehakse kaheksa mõõtmist (joonis 2.7), kusjuures neli neist on 16x16 lahutusega ja neli on 32x32 lahutusega. Mõlema lahutusega sooritatakse kaks mõõtmist diferentsiaalsete (DIF.) ja kaks mõõtmist mitte-diferentsiaalsete (MITTEDIF.) mustritega. Nii diferentsiaalsete mustripaaridega kui ka mittediferentsiaalsete mustritega mõõtmistest üks sooritatakse välisvalgustusega ja teine välisvalgustusega (VV). Välisvalguse allikaks oli eksperimentide kõrval asuv laualam.

<p>16x16</p> <p>DIFERENTSIAALNE</p>	<p>16x16</p> <p>DIFERENTSIAALNE VÄLISVALGUSTUSEGA</p>	<p>16x16</p> <p>MITTE- DIFERENTSIAALNE</p>	<p>16x16</p> <p>MITTE- DIFERENTSIAALNE VÄLISVALGUSTUSEGA</p>
<p>32x32</p> <p>DIFERENTSIAALNE</p>	<p>32x32</p> <p>DIFERENTSIAALNE VÄLISVALGUSTUSEGA</p>	<p>32x32</p> <p>MITTE- DIFERENTSIAALNE</p>	<p>32x32</p> <p>MITTE- DIFERENTSIAALNE VÄLISVALGUSTUSEGA</p>

JOONIS 2.7: Neli mõõtmist kaheksast sooritatakse 16x16 lahutusega ja neli 32x32 lahutusega. Mõlema lahutusega sooritatakse kaks mõõtmist diferentsiaalsete (DIF.) ja kaks mõõtmist mittediferentsiaalsete (MITTEDIF.) mustritega. Nii diferentsiaalse kui ka mittediferentsiaalse kuvamisega mõõtmistest sooritati üks välisvalgustusega ja teine välisvalgustusega (VV).

2.3 Üksikpikslikaamera meetodi eksperiment

Üksikpikslikaamera meetodi eksperimentis (joonis 2.8) on võrreldes arvutusliku kummituskuva eksperimentiga vahetatud omavahel vaid detektori ja valgusallika asukohad. Kusjuures eksperimentivahendid on täpselt samad nii arvutusliku kummituskuva kui ka üksikpikslikaamera eksperimentide korral. Ka valgustustingimused on kahe eksperimenti puhul püütud sarnased hoida. Selleks kontrolliti võimsusmõõtjaga mõlema eksperimenti puhul, kas täiesti valge ja täiesti musta musrti korral on detektorile jõudva valguse intensiivsused sarnased. Üksikpikslikaamera meetodi eksperimentis on valguse käik võrreldes arvutusliku kummituskuva eksperimentiga vastupidine. Esmalt valgustatakse objekti ja objektilt peegeldunud valgus jõuab seejärel objektiivi kaudu mikropheeglite maatriksile. Mikropheeglite maatriksile jõudnud valgust töödeldakse eelnevalt arvuti poolt genereeritud mustritega ning alles siis mõõdetakse valguse lõplik intensiivsus ühepikslise sensoriga. Mõlema meetodi puhul summeeritakse kujutise lõplikuks rekonstrueerimiseks intensiivsustega seostatud mustrid.



JOONIS 2.8: Üksikpikslikaamera meetodi eksperimendis liigub valgus võrreldes arvutusliku kummituskuva eksperimendiga justkui tagurpidi. Valgusdiodiga valgustatakse objekti, millelt peegeldunud valgus jõuab läbi objektiivi mikropeeglite matriksile. Mikropeeglite matriks töötleb talle jõudnud valgust mustritega, ning peegeldab valguse ühepikslisele detektorile.

Üksikpikslikaamera meetodi eksperimendi skeemiga sooritatakse sarnaselt arvutusliku kummituskuva eksperimendile kokku 24 mõõtmist, mis jagunevad identset juba kirjeldatud arvutusliku kummituskuva eksperimendile.

3 Tulemused ja analüüs

Selles peatükis esitatakse kahe üksikpiksli kuva meetodiga sooritatud mõõtmiste tulemused. Saadud tulemusi analüüsitakse mõõdetavate objektide kaupa, kommenteerides esmalt valge lehega mõõtmiseid. Seejärel analüüsitakse kahemõõtmelise objektiga ehk valge kummituse kujutisega tehtud mõõtmiseid ja viimaks kolmemõõtmelise objektiga ehk kolme valge palliga tehtud mõõtmiseid (joonis 2.5). Kahemõõtmeliseks objektiks valiti valge kummituse kujutis mustal taustal ja kolmemõõtmeliseks objektiks valiti kolm valget palli ilma taustata. Iga objektiga tehti kokku kaheksa mõõtmist, millest neli tehti 16x16 lahutusega ja neli 32x32 lahutusega. Mõlema lahutusega tehtud mõõtmistest kaks tehti diferentsiaalsete mustripaaride ehk vastandmustritega (DIF.) ja ülejäänud kaks mittediferentsiaalsete mustritega (MITTEDIF.). Nii diferentsiaalsel kui mittediferentsiaalsel kuvamisel tehti üks mõõtmine välisvalgustusega (VV). Välisvalguse allikaks oli eksperimentide kõrval asuv laualampe.

Analüüsi käigus selgitatakse kahe kuvamise meetodi tulemuste eripärasid ja nende eripärade põhjuseid. Lisaks tuuakse välja mõned ebaõnnestunud mõõtmised ja selgitatakse võimalikke põhjuseid.

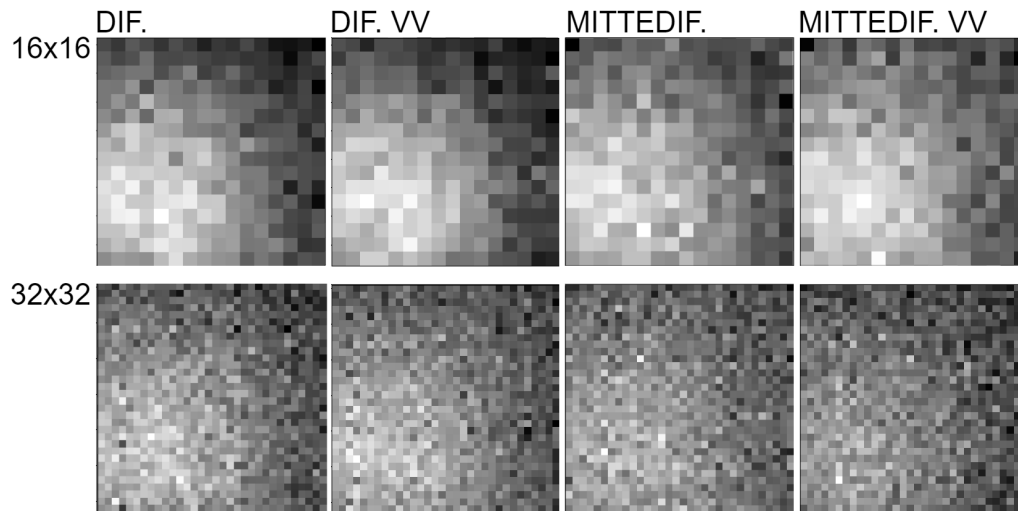
Kõik mõõtmistulemused normeeriti eraldi iga üksiku mõõtmise pikslite keskväärtuse järgi:

$$O_n = \frac{O}{\bar{O}},$$

kus O on pildisignaali, O_n on normeeritud pildisignaali ja \bar{O} on keskväärtus üle kõigi pikslite.

3.1 Valge lehega mõõtmised

Valge lehega mõõtmiste (joonis 3.1) eesmärgiks oli standardhälbe abil hinnata rekonstrueeritud kujutise mürataseme erinevate mõõtmiste korral. Üksikpikslikaamera meetodi eksperimenti skeemiga tehtud valge lehega mõõtmiste korral oli hüpoteesiks, et kõik rekonstrueeritava kujutise pikslite väärtused varieeruvad vähe, sest sihtmärk oli ühtlane ja seda püüti ka ühtlaselt valgustada.



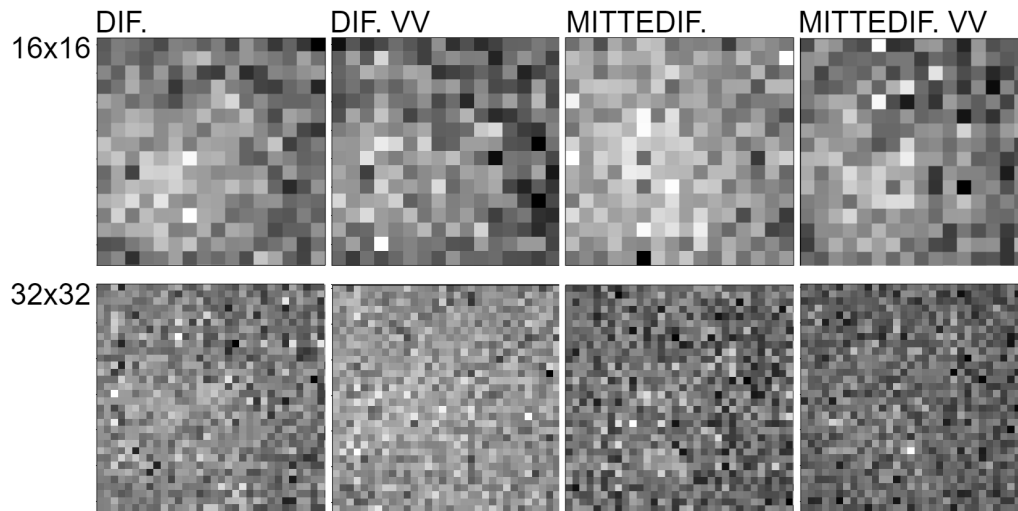
JOONIS 3.1: Üksikpikslikaamera eksperimendiga tehtud valge lehe mõõtmised, mille abil oli võimalik arvutada standardhälbed, et hinnata pikslite intensiivsuste varieeruvust.

Üksikpikslikaamera eksperimendi tulemuste (joonis 3.1) visuaalsel vaatlusel on hästi näha, et valget lehte pole õnnestunud kõige ühtlasemalt valgustada. Ebaühtlane valgustatus tulenes mingil määral sellest, et valgusallikat kasutati ilma hajutita ning tõenäoliselt oli mingi osa valgusest koondunud kindlasse piirkonda. Valgusallika tsentrit markeeriv heledam laik on mõõtmisel ja rekonstrueerimisel koondunud rohkem alumisse vasakusse nurka kui päris detektori vaatevälja keskmesse. On võimalik, et isegi kui valgusallika tsenter oleks jäänud detektori vaatevälja keskmesse, oleksid keskmised ja äärmised pikslid intensiivsustelt erinevad just normeerimise tõttu. Ebaühtlane valgustamine ja keskmise intensiivsuse järgi normeerimine mõjutavad teatud määral ka standardhälbe arvutust (tabel 3.1).

	Dif.	Dif. vv	Mittedif.	Mittedif. vv
16x16	0.35	0.36	0.37	0.38
32x32	0.42	0.41	0.46	0.44

TABEL 3.1: Üksikpiksli kaamera meetodi eksperimendi ja valge lehega mõõtmiste standardhälbed suurenevad ootuspäraselt lahutuse suurenemisega. Standarhälbed erinevad üksteisest siiski üsna vähe.

Arvutusliku kummituskuva valge lehega mõõtmiste (joonis 3.2) puhul eeldati, et rekonstrueeritud pildi pikslite intensiivsuste varieeruvus on minimaalne, sest sihtmärgiks olev objekt oli ühtlaselt valge ja seda püüti ka ühtlaselt valgustada. Kusjuures valgustustingimused üritati teha sarnaseks eelnenud üksikpikslikaamera eksperimendiga.



JOONIS 3.2: Arvutusliku kummituskuvaga eksperimendiga tehtud valge lehe mõõtmiste puhul näitavad selle kuvamise meetodi puhul pikslite intensiivsuste üsna suurt varieeruvust.

Arvutusliku kummituskuva kõikide valge lehega mõõtmiste puhul (joonis 3.2) varieeruvad pikslite intensiivsused üsna palju ja rekonstrueeritud piltidel on müra oodatust rohkem. Pikslite keskmist kõrvalekallet vastava mustri signaali alaliskomponendist kirjeldatakse (sarnaselt eelnevale meetodile) standardhälbega (tabel 3.2).

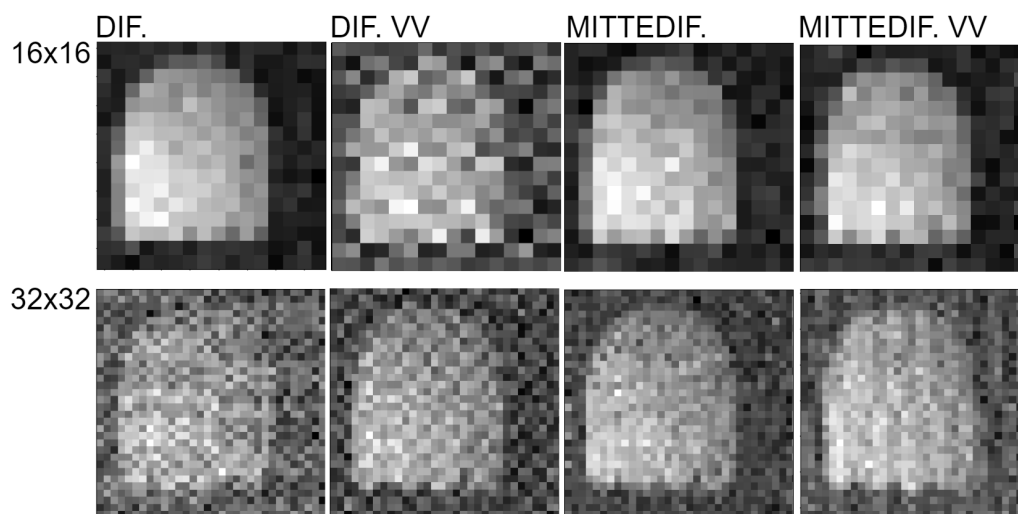
	Dif.	Dif. vv	Mittedif.	Mittedif. vv
16x16	0.73	0.75	0.81	0.86
32x32	1.28	1.31	1.73	1.65

TABEL 3.2: Arvutusliku kummituskuva eksperimendi ja valge lehega mõõtmiste standardhälbed. Ootuspäraselt suureneb standardhälve lahutuse suurenemisega ning välisvalgustusega (VV) mõõtmiste standardhälbed on enamasti suuremad kui välisvalgustusega mõõtmiste standardhälbed.

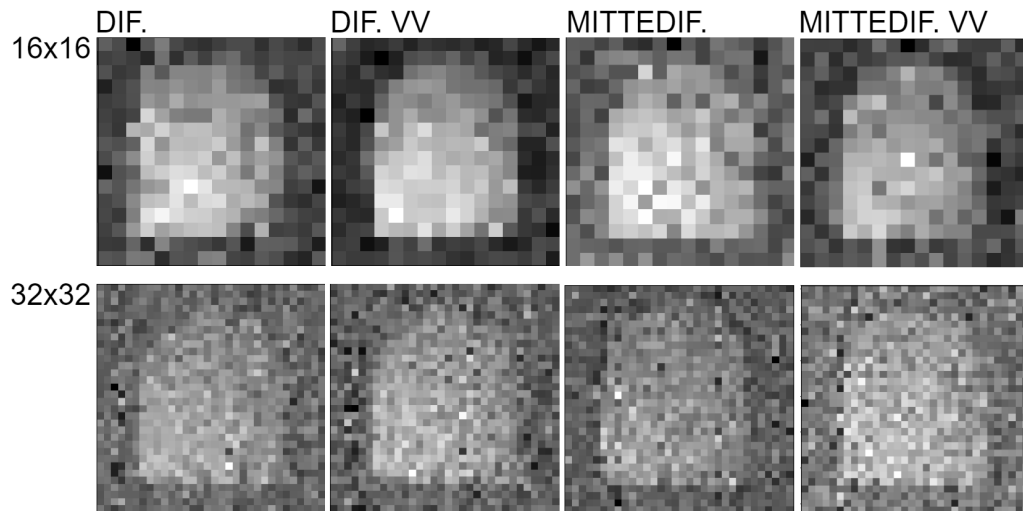
Võrreldes üksikpikslikaamera ja arvutusliku kummituskuva eksperimendi mõõtmiste standardhälbeid, on üksikpikslikaamera meetodi mõõtmiste standardhälvete väärtused palju väiksemad. See näitab, et pikslite intensiivsused varieeruvad vähem ja seega on rekonstruktsioonidel vähem müra. Visuaalsel vaatlusel võib öelda, et valge lehega mõõtmiste korral ei ole suurt vahet, kas kasutada mõõtmistel diferentsiaalseid või mittediferentsiaalseid mustrikomplekte. Küll aga peab paika see, et lahutuse suurenemisega suureneb ka müra.

3.2 Kahemõõtmelise objektiga mõõtmised

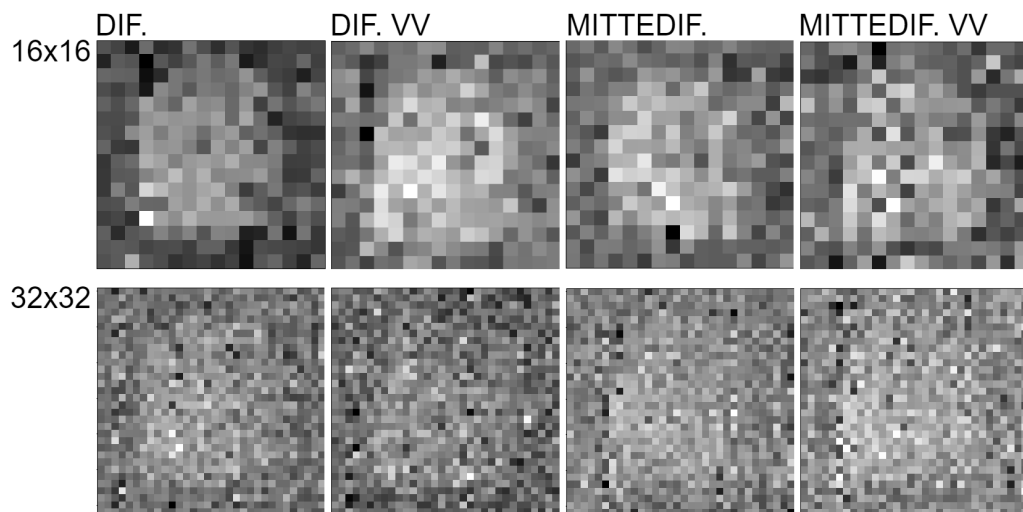
Arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodiga mõõdeti kahemõõtmelist objekti, milleks oli valge kummitus mustal paberil (joonis 2.5). Kõik mõõtmiseid teostati kahe lahutusega, 16x16 ja 32x32 pikslit. Sellele lisaks tehti mõõtmisi diferentsiaalsete (DIF.) ja mitte diferentsiaalsete (MITTEDIF.) mustritega ning mõlemal juhul nii välisvalgusega (VV.) kui ilma välisvalguseta. Üksikpikslikaamera meetodi esmase mõõteseeria (joonis 3.3) puhul on mitmel rekonstrueeritud kujutisel selgelt näha mingi muster, mis on sinna sattunud tõenäoliselt mõõtmise sooritamise ajal. Ilmselt on probleem tekkinud sellest, et mustri kuvamine ja vastava väärtuse lugemine detektoriga pole toimunud sünkroonis. Üksikpiksliku esmase mõõtmeseeria mustrilisuse tõttu sooritati samade parameetritega kordusmõõtmised (joonis 3.4), kus mustrid rekonstruktsioonile peale ei jäänud. Arvutusliku kummituskuva meetodiga sooritatud mõõtmiste (joonis 3.5) puhul mustrilisust ei esinenud, kuid detektori pinna kahjustuse tõttu on arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera mustriteta mõõteseeria mõõtmised mürasemad.



JOONIS 3.3: Üksikpiksli kaamera meetodi eksperimendi skeemiga, kahemõõtmelise objektiga ja mõrata detektoriga tehtud mõõtmised. Rekonstrueeritud pildid on kontrastsed ja objekti piirjooni on kerge märgata.



JOONIS 3.4: Üksikpiksli kaamera eksperimendi kordusmõõtmised kahemõõtmelise objektiga, kus ei ole esimestel mõõtmistel olevaid mustreid, aga on suurem müra, mis on ilmselt põhjustatud detektori pinnal olevast mõrast.



JOONIS 3.5: Arvutusliku kummituskuva eksperimendi, mõrase detektori ja kahemõõtmelise objektiga tehtud mõõtmised, mis näitavad, et välisvalgustuse (VV) kasutamine ei paranda selle kuvamismeetodi puhul signaali-müra suhet.

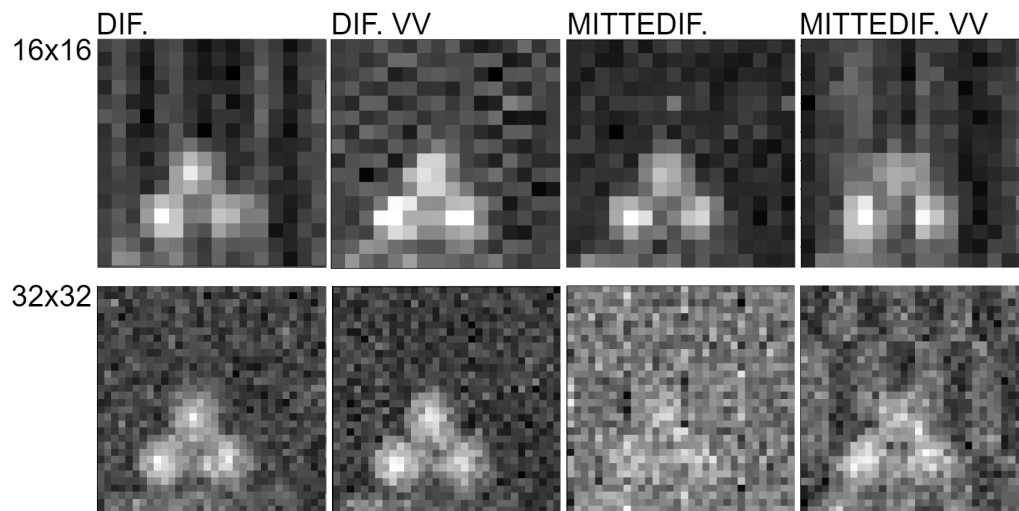
Mõõtmistulemuste põhjal võib öelda, et kõige paremini on kahemõõtmeline objekt eristatav üksikpikslikaamera eksperimendi skeemiga tehtud esmasel mõõteseerial (joonis 3.3), kus osadele mõõtmistele on mustrid peale jäänud. Selle komplekti puhul annavad kõikide parameetritega mõõtmised üsna arvestatavaid tulemusi. Kuna detektori pinnale tekkis kukkumise tõttu mõra, siis on omavahel võrreldavad ainult üksikpikslikaamera meetodi kordusmõõtmised (joonis 3.4) ja arvutusliku kummituskuva mõõtmised (joonis 3.5). Hilisemate mõõteseeriatega võrreldes üksikpikslikaamera esimese mõõteseeriaga

võibki suuresti detektori pinnal olevast mörast tingitud olla ja seega on raske hinnata üksikpikslikaamera esmase mõõteseeria kvaliteeti.

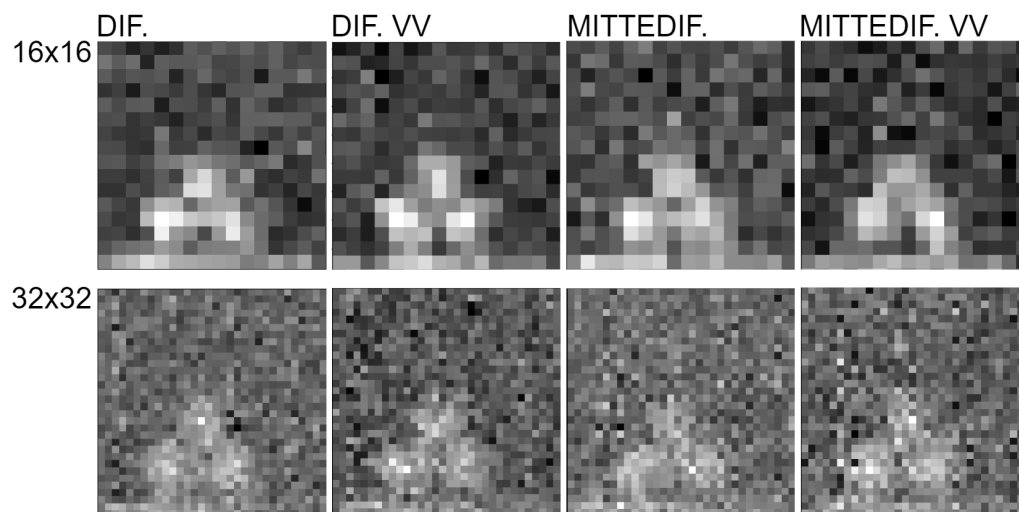
Võrreldavate mõõtmiste puhul võib üldistada, et üksikpikslikaamera meetod (joonis 3.4) annab paremaid tulemusi kui arvutuslik kummituskuva (joonis 3.5). Ootuspäraselt on üksikpikslikaamera meetodi puhul välisvalgustuse (VV) kasutamine abiks, sest detektori mõõdetava moduleeritud valguse intensiivsus on suurem. Üksikpikslikaamera 16x16 lahutusega mõõtmistel on objekti kujutise ja tumeda tausta kontrast parem kui arvutusliku kummituskuva mõõtmistel. Ka kujutise piirjooned on üksikpikslikaamera meetodi puhul paremini jälgitavad. 32x32 lahutusega mõõtmiste puhul on kontrastsuse ja välisvalgustuse kasutamise sõltuvust raskem märgata, sest müra on signaaliga peaaegu samas suurusjärgus. Välisvalguse lisamine arvutusliku kummituskuva (joonis 3.5) puhul rekonstrueerimise kvaliteet ei paranda, pigem on kujutis välisvalgusega mõõtmiste puhul halvemini eristatav. Üksikpikslikaamera meetodi puhul on näha, et diferentsiaalse mustrikomplekti (DIF.) ja mittediferentsiaalsete mustrite (MITTEDIF.) kasutamine annavad üsna sarnaseid tulemusi. Arvutusliku kummituskuva puhul võib öelda, et diferentsiaalne kuvamine on vaid 16x16 lahutusega ja välisvalgustusega mõõtmistel andnud paremaid tulemusi kui mittediferentsiaalsete mustrite kasutamine. Ootuspäraselt suureneb mõlema kuvamismeetodiga sooritatud mõõtmistel lahutuse suurenemisega ka müra, mis võib olla tingitud signaali vähesusest või kordusmõõtmiste puhul ka näiteks detektori pinnal olevast mörast.

3.3 Kolmemõõtmelise objektiga mõõtmised

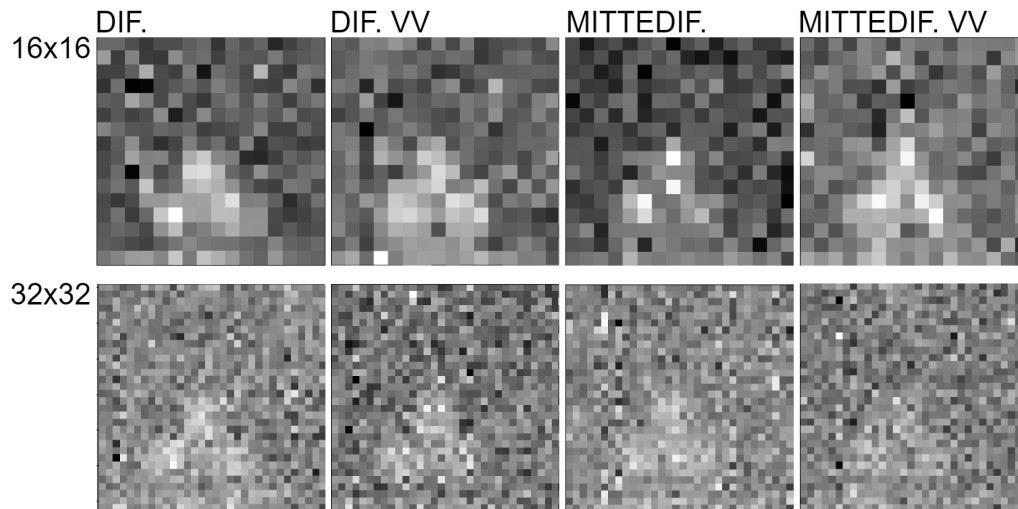
Mõõtmisi otsustati teha kahemõõtmelisele objektile lisaks ka kolmemõõtmelise objektiga, et näha, kas ja kui palju raskem on rekonstrueerida kahemõõtmelist kujutist kolmemõõtmelisest objektist. Kolmemõõtmelise objektiga, milleks oli kolm valget kera (joonis 2.5) ilma taustata, tehti täpselt samu mõõtmisi, mis kahemõõtmelise objektiga. Ka kolmemõõtmelise objekti puhul teostati üksikpikslikaamera eksperimendiga kordusmõõtmised (joonis 3.7), sest esimene mõõteseeria tuli mustiline (joonis 3.6) ja ei olnud seega arvutusliku kummituskuva mõõtmistega (joonis 3.8) võrreldav. Sarnaselt kahemõõtmelise objektiga mõõtmistele oli ka kolmemõõtmelise objekti puhul üksikpikslikaamera mustiline mõõteseeria tehtud enne kui detektori pind sai kahjustada.



JOONIS 3.6: Üksikpiksli kaamera meetodiga, kolmemõõtmelise objekti ja terve detektoriga tehtud mõõtmiste tulemused. Osadel rekonstruktsioonidel on sisse jäänud must-rid.



JOONIS 3.7: Üksikpiksli kaamera meetodi eksperimendi ja mürase detektoriga tehtud mõõtmiste tulemused. Välisvalgustusega (VV) mõõtmistel on objekt paremini eristatav.



JOONIS 3.8: Arvutusliku kummituskuva eksperimendi, kolmemõõtmelise objekti ja katkise detektoriga tehtud mõõtmised. Välisvalgustusega (VV) sooritatud mõõtmised on kehvemad kui välisvalgustusega mõõtmised.

Üksikpikslikaamera meetodi mustriilise mõõteseeria (joonis 3.6) piltide kvaliteet ja kontrast on üpris head. Kolmemõõtmeline objekt on hästi eristatav ja piirjooned on eriti diferentsiaalse (DIF.) kuvamise korral hästi jälgitavad. Selle mõõteseeria andmed on kogutud detektoriga, mille pind oli kahjustuseta, mistõttu on potentsiaalselt selgitatav selle mõõtekomplekti parem kontrast ja piirjoonte suurem teravus. Üksikpiksli kaamera eksperimendi mõõtmiste teise mõõteseeria (joonis 3.7) mõõtmised tehti mõrased detektoriga. Diferentsiaalsete (DIF) mustrite kasutamisel mittediferentsiaalsete (MITTEDIF) mustrite kasutamise ees märgatavaid eeliseid ei ole. Küll on näha, et välisvalgustuse (VV) kasutamine on parandanud nii diferentsiaalset kui ka mittediferentsiaalset mõõtmist nii 16x16 lahutuse kui ka 32x32 lahutuse korral. Objekt ise on olnud paremini valgustatud ja seega on ühepiksliisele detektorile jõudnud rohkem objektilt peegeldunud valgust, mistõttu on rekonstrueeritud kujutise kvaliteet parem. Sarnaselt kahemõõtmelise objekti mõõtmistele, kasvab ka kolmemõõtmelise objekti mõõtmise puhul suurema lahutusega mõõtmistel müra. Kolmemõõtmelise objekti puhul lisandub peegeldunud valguse hajumine objekti servadelt, mis muudab objekti piirjooned veelgi hägusamaks.

Üldiselt võib arvutusliku kummituskuva kolmemõõtmelise objektiga mõõtmiste (joonis 3.8) kohta öelda sama, mis kahemõõtmelise objektiga mõõtmiste kohta. Valgete kerade piirjooned on hägusad, rekonstrueeritud pildid tervikuna on müra ja objekti on raske eristada. Kuna tegemist on sama kolmemõõtmelise objektiga, mis üksikpikslikaamera eksperimendis, siis toimub ka siin peegeldunud valguse hajumine objekti servadelt, mis hägustab objekti piirjooni. Lisaks võib öelda, et mittediferentsiaalsete (MITTEDIF.) mustritega mõõtmistel on kolme valget palli peaaegu võimatu taustast eristada. Sarnaselt kahemõõtmelise objektiga mõõtmistele on näha, et arvutusliku kummituskuva kuvamismeetodi puhul pole välisvalgustuse (VV) kasutamine eelistatud, sest paistab kontrasti

objekti ja tausta vahel langetavat. Ka arvutusliku kummituskuva mõõtmiste puhul suureneb müra ootuspäraselt lahutuse suurenemisega.

Kokkuvõttes võib öelda, et üksikpiksli kaamera meetodi eksperimendi skeemiga saadud tulemused on veidi paremad kui arvutusliku kummituskuva eksperimendi skeemiga saadud tulemused. Kolmemõõtmelise objektiga tehtud mõõtmiste puhul on üksikpiksli kaamera meetodi mõõtmised kontrastsemad ja objektide piirjooned on paremini eristatavad. Näidatud tulemustest on ka näha, et kui detektori pind oleks kõikide mõõtmiste ajal olnud terve, oleksid ka teised mõlema kuvamise meetodi eksperimendi mõõtmised tulnud parema kontrastiga (sarnaselt üksikpiksli kaamera meetodi mustriliste mõõtmistele), sest teised eksperimentide parameetrid vahepeal ei muutunud.

Kokkuvõte

Üksikpiksli kuva võimaldab rekonstrueerida kujutist struktureeritud valgustamise ja ühepikslise detektoriga. Sellist kuvamismeetodit saab kasutada rakendustes, kus mitmepikslise sensoriga kujutise jäädvustamine on raskendatud, madala lahutusega või liialt kulukas. Üksikpiksli kuva kaks alameetodit, mis võimaldavad arvutuslikult suurendada objekti rekonstruktsiooni lahutust, on arvutuslik kummituskuva ja üksikpikslikaamera.

Lõputöö eesmärgiks oli võrrelda arvutuslikku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodit. Nende meetodite puhul on objektist kujutise rekonstrueerimine matemaatiliselt identne, kuid eksperimentaalselt erinev. Arvutusliku kummituskuva puhul valgustatakse objekti valgusmuustritega ning seostatakse iga mustri korral ühepikslisele detektorile jõudva valguse intensiivsus. Üksikpikslikaamera meetodi puhul valgustatakse esmalt objekti ja moduleeritakse objektilt peegeldunud valgust muustritega, mis seostatakse taas ühepikslisele detektorile jõudnud valguse intensiivsustega. Selleks, et saada ühest kuvamisemeetodist teine kuvamismeetod, tuleb vahetada vaid valgusallika ja detektori asukohad ehk sooritada n-ö pööratavuse katse. Kasutades eksperimentides samu eksperimentdivahendeid ja luues võimalikult sarnased valgustustingimused, teeb eksperimentide pööratavus võimalikuks kahe meetodite võrdlemise.

Mõõtmisi tehti mõlema kuvamismeetodi puhul kolme erineva objektiga ja iga objektiga sooritati kaheksa erinevate parameetrite kombinatsiooniga mõõtmist. Neli mõõtmist kaheksast sooritati 16x16 lahutusega ja neli 32x32 lahutusega. Mõlema lahutusega sooritati kaks mõõtmist diferentsiaalsete mustripaaridega (DIF.) ja kaks mõõtmist mittediferentsiaalsete muustritega (MITTEDIF.). Nii diferentsiaalse kui ka mittediferentsiaalse kuvamisega mõõtmistest sooritati üks välisvalgustusega ja teine välisvalgustusega (VV).

Üldjoontes võib öelda, et kahe matemaatiliselt identse kuvamismeetodi võrdluses saavutati paremaid tulemusi üksikpiksli kaamera meetodi eksperimendiga. Võrreldes arvutusliku kummituskuva eksperimendi mõõtmistega on üksikpikslikaamera meetodi mõõtmised kontrastsemad, kujutiste piirjooned selgemad ja rekonstrueeritud pildid on vähem müra-
sed. Mõõtmistest järeldub ootuspäraselt, et üksikpikslikaamera meetodi puhul parandab välisvalgustuse kasutamine rekonstrueeritava kujutise kvaliteeti, sest ühepikslisele detektorile jõuab selle meetodi eksperimendi puhul rohkem signaali. Arvutusliku kummituskuva puhul parandab kujutise kvaliteeti diferentsiaalne ehk vastandmuustritega kuvamine, kuid märgatavalt vähem kui näiteks üksikpikslikaamera korral välisvalgustuse kasutamine. Üksikpiksli kuva puhul on oodatavaks tulemuseks ka see, et rekonstrueeritava objekti lahutuse suurenemisega suureneb ka müra.

Välisvalgustusega mõõtmiste korral püstitatud hüpoteesiks oli, et ühe kuvamismeetodi tulemused on ekvivalentsed teise kuvamismeetodi tulemustega. Tuleb tõdeda, et see hüpotees ei leidnud kinnitust ning mõõtmistulemused viitavad sellele, et põhjuseks oli eksperimentide identsete tingimuste mittesaavutamine. Välisvalgustusega mõõtmiste korral oli hüpoteesiks, et arvutusliku kummituskuva mõõtmised on mürasemad kui üksikpikslikaamera samalaadsed mõõtmised. Mõõtmistulemuste visuaalsest vaatlusest ja analüüsist lähtuvalt võib öelda, et teine hüpotees pidas paika, kuid väga suure signaali-müra suhte tõttu seda täiesti kindlalt väita ei saa.

Kuna eksperimentide käigus sai detektori pind kannatada, siis on töö edasiarendusena võimalik teha kordusmõõtmisi kahjustusteta detektoriga, mis eeldatavasti annab vähem müraseid tulemusi. Lisaks on võimalik suurendada detektorile jõudva signaali intensiivsust, et mõõtmistulemused oleksid kontrastsemad ja kujutise piirjooned kergemini eristatavad.

Töö autor soovib tänada mitmekülgse, positiivse ja kannatliku juhendamise eest Jan Bogdanovit ja Sandhra-Mirella Valdmata. Tänu kuulub ka Andreas Valdmannile, kes oli igal hetkel valmis teemal diskuteerima ja konsulteerima. Lisaks lähevad tänusõnad mentori-tele Joonas Arivale ja Jürgen Luusile, kes hoidsid oma eeskujuga kogu bakalaureuseõppe ajal motivatsiooni kõrgel. Viimaks soovib autor tänada Robert Kuksi, kes oli alati valmis seletama ja vastama ka kõige lihtsamana näivatele küsimustele.

Kirjandus

- [1] Leo Gross, Fabian Mohn, Nikolaj Moll, Bruno Schuler, Alejandro Criado, Enrique Guitián, Diego Peña, André Gourdon, and Gerhard Meyer. Bond-order discrimination by atomic force microscopy. *Science*, 337(6100):1326–1329, 2012.
- [2] Holland C Ford, Frank Bartko, Pierre Y Bely, Tom Broadhurst, Christopher J Burrows, EdwardŠ Cheng, Mark Clampin, James H Crocker, Paul D Feldman, David A Golimowski, et al. Advanced camera for the hubble space telescope. In *Space Telescopes and Instruments V*, volume 3356, pages 234–248. International Society for Optics and Photonics, 1998.
- [3] Allan Sandage. Classification and stellar content of galaxies obtained from direct photography. *Galaxies and the Universe*, pages 1–33, 1975.
- [4] Ron Kalin and MarshallŠ Stanton. Current clinical issues for mri scanning of pacemaker and defibrillator patients. *Pacing and clinical electrophysiology*, 28(4):326–328, 2005.
- [5] Graham M Gibson, Steven D Johnson, and Miles J Padgett. Single-pixel imaging 12 years on: a review. *Optics Express*, 28(19):28190–28208, 2020.
- [6] Kamal Nasrollahi and Thomas B Moeslund. Super-resolution: a comprehensive survey. *Machine vision and applications*, 25(6):1423–1468, 2014.
- [7] Edoardo Charbon, Matt Fishburn, Richard Walker, Robert K Henderson, and Cristiano Niclass. Spad-based sensors. In *TOF range-imaging cameras*, pages 11–38. Springer, 2013.
- [8] Matthew P Edgar, Graham M Gibson, and Miles J Padgett. Principles and prospects for single-pixel imaging. *Nature photonics*, 13(1):13–20, 2019.
- [9] Jeffrey H Shapiro. Computational ghost imaging. *Physical Review A*, 78(6):061802, 2008.
- [10] David L Donoho. Compressed sensing. *IEEE Transactions on information theory*, 52(4):1289–1306, 2006.
- [11] Marc Aβmann and Manfred Bayer. Compressive adaptive computational ghost imaging. *Scientific reports*, 3(1):1–5, 2013.
- [12] T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov, and A. V. Sergienko. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement. *Physical Review A*, 52(5):R3429, 1995.

- [13] Ryan S Bennink, Sean J Bentley, and Robert W Boyd. “two-photon” coincidence imaging with a classical source. *Physical review letters*, 89(11):113601, 2002.
- [14] Miles J Padgett and Robert W Boyd. An introduction to ghost imaging: quantum and classical. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2099):20160233, 2017.
- [15] Alejandra Valencia, Giuliano Scarcelli, Milena D’Angelo, and Yanhua Shih. Two-photon imaging with thermal light. *Physical review letters*, 94(6):063601, 2005.
- [16] Yaron Bromberg, Ori Katz, and Yaron Silberberg. Ghost imaging with a single detector. *Physical Review A*, 79(5):053840, 2009.
- [17] Alessandra Gatti, Enrico Brambilla, Morten Bache, and Luigi A Lugiato. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation. *Physical review letters*, 93(9):093602, 2004.
- [18] Joonas Ariva. Arvutuslik kummituskuva videoprojektori kuvasuhtega. Bakalareuse-töö, Tartu Ülikool, 2019.
- [19] Mingnan Le, Gao Wang, Huabin Zheng, Jianbin Liu, Yu Zhou, and Zhuo Xu. Underwater computational ghost imaging. *Optics express*, 25(19):22859–22868, 2017.
- [20] Chun-Ling Luo, Wen-Xiu Wan, Si-Yu Chen, Ao-Fan Long, Ling-Na Peng, Shi-Fang Wu, and Hao-Ran Qi. High-quality underwater computational ghost imaging with shaped lorentz sources. *Laser Physics Letters*, 17(10):105209, 2020.
- [21] Dongfeng Shi, Chengyu Fan, Pengfei Zhang, Jinghui Zhang, Hong Shen, Chunhong Qiao, and Yingjian Wang. Adaptive optical ghost imaging through atmospheric turbulence. *Optics express*, 20(27):27992–27998, 2012.
- [22] Chun-Ling Luo and Ling-Qing Zhuo. High-resolution computational ghost imaging and ghost diffraction through turbulence via a beam-shaping method. *Laser Physics Letters*, 14(1):015201, 2016.
- [23] Saad Rizvi, Jie Cao, Kaiyu Zhang, and Qun Hao. Deepghost: real-time computational ghost imaging via deep learning. *Scientific Reports*, 10(1):1–9, 2020.
- [24] Matthew P Edgar, Graham M Gibson, Richard W Bowman, Baoqing Sun, Neal Radwell, Kevin J Mitchell, Stephen S Welsh, and Miles J Padgett. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors. *Scientific reports*, 5(1):1–8, 2015.
- [25] Ming-Jie Sun, Ling-Tong Meng, Matthew P Edgar, Miles J Padgett, and Neal Radwell. A russian dolls ordering of the hadamard basis for compressive single-pixel imaging. *Scientific reports*, 7(1):1–7, 2017.
- [26] Stephen Stewart Welsh. *Applications of single-pixel imaging*. PhD thesis, University of Glasgow, 2014.

- [27] Marco F Duarte, Mark A Davenport, Dharmpal Takhar, Jason N Laska, Ting Sun, Kevin F Kelly, and Richard G Baraniuk. Single-pixel imaging via compressive sampling. *IEEE signal processing magazine*, 25(2):83–91, 2008.
- [28] David Shrekenhamer, Claire M Watts, and Willie J Padilla. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator. *Optics express*, 21(10):12507–12518, 2013.
- [29] Wai Lam Chan, Kriti Charan, Dharmpal Takhar, Kevin F Kelly, Richard G Baraniuk, and Daniel M Mittleman. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing. *Applied Physics Letters*, 93(12):121105, 2008.
- [30] Baoqing Sun, Matthew P Edgar, Richard Bowman, Liberty E Vittert, Stuart Welsh, Adrian Bowman, and Miles J Padgett. 3d computational imaging with single-pixel detectors. *Science*, 340(6134):844–847, 2013.
- [31] Ming-Jie Sun, Matthew P Edgar, Graham M Gibson, Baoqing Sun, Neal Radwell, Robert Lamb, and Miles J Padgett. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution. *Nature communications*, 7(1):1–6, 2016.
- [32] Ming-Jie Sun, Matthew P Edgar, David B Phillips, Graham M Gibson, and Miles J Padgett. Improving the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging using digital microscanning. *Optics express*, 24(10):10476–10485, 2016.
- [33] F Ferri, D Magatti, LA Lugiato, and A Gatti. Differential ghost imaging. *Physical review letters*, 104(25):253603, 2010.
- [34] Stephen S Welsh, Matthew P Edgar, Richard Bowman, Phillip Jonathan, Baoqing Sun, and Miles J Padgett. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors. *Optics express*, 21(20):23068–23074, 2013.
- [35] Xu-Ri Yao, Wen-Kai Yu, Xue-Feng Liu, Long-Zhen Li, Ming-Fei Li, Ling-An Wu, and Guang-Jie Zhai. Iterative denoising of ghost imaging. *Optics express*, 22(20):24268–24275, 2014.
- [36] Texas Instruments. Dlp6500 0.65 1080p mvsp s600 dmd datasheet (rev. b). https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp6500fye.pdf?ts=1618429229537&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [37] Dana Dudley, Walter M Duncan, and John Slaughter. Emerging digital micromirror device (dmd) applications. In *MOEMS display and imaging systems*, volume 4985, pages 14–25. International Society for Optics and Photonics, 2003.
- [38] Thorlabs. S120c-specsheet, . <https://www.thorlabs.com/drawings/d14b75e30709973-CDEC3FE3-DEA4-7BA9-F9732AE764E7D161/S120C-SpecSheet.pdf>, note = Accessed: 8-4-2021,.

-
- [39] Thorlabs. Optical power and energy meter operation manual, . <https://www.thorlabs.com/drawings/aae078889c3dfb90-FA02A6A4-C85C-8C5E-1278F3BF1ACD5FEE/PM100D-Manual>. pdf, note = Accessed: 23-4-2021,.
- [40] BenQ. Ht2150st home theater datasheet. https://www.projectorcentral.com/pdf/projector_spec_9597.pdf, note = Accessed: 8-4-2021,.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Anette Kuuseorg,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Arvutusliku kummituskuva ja üksikpikslikaamera meetodi võrdlus,

mille juhendajad on Jan Bogdanov ja Sandhira-Mirella Valdma, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Anette Kuuseorg,
28.05.2021